

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

Année 1932

THÈSE

297

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

Diplôme d'Etat

par

PAUL LAURENT

né le 3 juillet 1906 à Brest (Finistère)

Contribution à l'étude de
l'origine et des
altérations des eaux thermales
d'Aix-les-Bains

Président : M^r le Professeur TANON..

IMPRIMERIE MOUYSET

145 bis, Rue d'Alésia, 145 bis

PARIS

1932

702



Digitized by the Internet Archive
in 2026

**Contribution à l'Étude de
l'origine et des
altérations des eaux thermales
d'Aix-les-Bains**

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

Année 1932
—

THÈSE

N°

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

Diplôme d'Etat

par

PAUL LAURENT

né le 3 juillet 1906 à Brest (Finistère)

**Contribution à l'étude de
l'origine et des
altérations des eaux thermales
d'Aix-les-Bains**

Président : M^r le Professeur TANON..

IMPRIMERIE MOUYSET

145 bis, Rue d'Alésia, 145 bis

PARIS

—
1932



I. — PROFESSEURS

	MM.
Anatomie	ROUVIÈRE.
Anatomie médico-chirurgicale et chirurgie expérimentale.	GRÉGOIRE.
Physiologie	BINET.
Physique médicale	STROHL.
Chimie médicale	DESGREZ.
Bactériologie	LEMIERRE.
Parasitologie et histoire naturelle médicale.....	BRUMPT.
Pathologie et thérapeutique générales.....	BAUDOUIN.
Pathologie médicale	CLERC.
Pathologie chirurgicale	LENORMANT.
Anatomie pathologique	ROUSSY.
Histologie	CHAMPY.
Pharmacologie et matière médicale.....	TIFFENEAU
Thérapeutique	LOEPER.
Hygiène et médecine préventive.....	TANON.
Médecine légale	BALTHAZARD.
Histoire de la médecine et de la chirurgie.....	LAIGNEL-LAVASTINI
Pathologie expérimentale et comparée.....	FIESSINGER.
Hydrologie thérapeutique et climatologie.....	M. VILLARET.
	CARNOT.
Clinique médicale	BEZANÇON.
	ACHARD.
	Marcel LABBÉ
Hygiène et clinique de la première enfance.....	LEREBOULET.
Clinique des maladies des enfants.....	NOBÉCOURT.
Clinique des maladies mentales et des maladies de l'encéphale	H. CLAUDE.
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques.....	GOUGEROT.
Clinique des maladies du système nerveux.	GUILLAIN.
Clinique des maladies infectieuses	TEISSIER.
	DELBET.
Clinique chirurgicale	CUNÉO.
	LEJARS.
	GOSSET.
Clinique ophtalmologique	TERRIEN.
Clinique urologique	LEGUEU.
	COUVELAIRE.
Clinique d'accouchements	BRINDEAU.
	JEANNIN.
Clinique gynécologique	J.-L. FAURE.
Clinique chirurgicale infantile et orthopédie.....	OMBRÉDANNE.
Clinique thérapeutique médicale.....	RATHERY.
Clinique oto-rhino-laryngologique	LEMAITRE.
Clinique thérapeutique chirurgicale.....	Pierre DUVAL.
Clinique propédeutique	SERGENT.
Clinique de la tuberculose.....	Léon BERNARD.
Professeur sans chaire.....	MAUCLAIRE.
	MULON.

AGRÉGÉS EN EXERCICE

MM.

ALAJOUANINE	<i>Neurologie et psychiatrie.</i>
AUBERTIN	<i>Pathologie médicale.</i>
BÉNARD Henri . . .	<i>Pathologie médicale.</i>
BROCO	<i>Pathologie chirurgicale.</i>
BRULÉ	<i>Pathologie médicale.</i>
BUSQUET	<i>Pharmacologie.</i>
CADENAT	<i>Pathologie chirurgicale</i>
CATHALA	<i>Pathologie médical</i>
CHABROL	<i>Pathologie médicale.</i>
CHAILLEY-BERT . . .	<i>Physiologie.</i>
CHEVALLIER	<i>Pathologie médicale.</i>
DOGNON	<i>Physique.</i>
DONZELOT	<i>Pathologie médicale.</i>
ÉCALLE	<i>Obstétrique.</i>
FEY	<i>Urologie.</i>
GASTINEL	<i>Bactériologie.</i>
GATELLIER	<i>Pathologie chirurgicale.</i>
DE GAUDART	
D'ALLAINES	
GIROUD	<i>Pathologie chirurgicale.</i>
HARVIER	<i>Histologie.</i>
HAZARD	<i>Pathologie médicale.</i>
HOVELACQUE	<i>Pharmacologie.</i>
HUGUENIN	<i>Anatomie.</i>
HUTINEL	<i>Pathologie médicale.</i>
JOANNON	<i>Hygiène.</i>
LABBÉ (Henri) . . .	<i>Parasitologie.</i>
LAROCHE (Guy) . . .	<i>Chimie biologique.</i>
LEVEUF	<i>Pathologie médicale.</i>
LÉVY-VALENSI	<i>Pathologie chirurgicale.</i>
LIAN	<i>Neuro-psychiatre.</i>
MULON	<i>Pathologie médicale.</i>
MONDOR	<i>Histologie.</i>
MOREAU	<i>Pathologie chirurgicale.</i>
MOULONGUET	<i>Pathologie médicale</i>
MOURE	<i>Pathologie chirurgicale.</i>
OBERLING	<i>Pathologie chirurgicale.</i>
OLIVIER	<i>Anatomie pathologique.</i>
PIÉDELIÈVRE	<i>Anatomie.</i>
PORTES	<i>Médecine légale.</i>
QUÉNU	<i>Obstétrique.</i>
RICHEL	<i>Pathologie chirurgicale.</i>
SANNIÉ	<i>Physiologie.</i>
SÉZARY	<i>Chimie biologique.</i>
	<i>Dermatologie et syphiligraphie.</i>
VALLÉRY-RADOT . . .	
(Pasteur)	
VAUDESCAL	<i>Pathologie médicale.</i>
VELTER	<i>Obstétrique.</i>
VERNE	<i>Ophtalmologie</i>
VIGNES	<i>Histologie.</i>
	<i>Obstétrique.</i>

III. — AGRÉGÉS RAPPELÉS EN EXERCICE

POUR LE SERVICE DES EXAMENS

MM.		MM.	
GUÉNIOT	Obstétrique.	NEVEU-LEMAIRE	Parasitologie.
LEQUEUX	Obstétrique.	RETTERER	Histologie.
LEROUX ..	Anatomie pathologique.	ZIMMERN	Physique.

IV. — AGRÉGÉS CHARGÉS DE COURS DE CLINIQUE ANNEXE

A TITRE PERMANENT

MM.		MM.	
ABRAMI	Clinique médicale.	MATHIEU	Clinique chirurgic.
CHIRAY	— id. —	MOCQUOT	— id. —
DEBRÉ	— id. —	PROUST	— id. —
DUVOIR	— id. —	SCHWARTZ	— id. —
BASSET	Clinique chirurgic.	LE LORIER	— id. —
CHEVASSU	— id. —	LÉVY-SOLAL	Clinique obstétric.
HEITZ-BOYER	— id. —	METZGER	— id. —

V. — CHARGÉS DE COURS

MM MATCLAIRE, professeur sans chaire	Chargé du cours de chirurgie orthopédique chez l'adulte pour les accidents du travail, les mutilés de guerre et les infirmes adultes.
FREY	Stomatologie.
CHAILLE-BERT	Education physique.
LEDoux-LEBARD	Radiologie clinique.
WEIL-HALLÉ	Puériculture.

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'École a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

*A la mémoire de mon père,
le Capitaine PAUL LAURENT,
mort pour la France à Oued Zem (Maroc),
le 15 mars 1913*

A MA MERE

*A Monsieur le Professeur LOUIS TANON,
Professeur d'Hygiène à la Faculté de Médecine
de Paris,
Médecin inspecteur général des Services d'Hygiène
de la Ville de Paris,
Conseiller technique sanitaire
du Ministère de la Santé publique,
Membre du Conseil supérieur d'Hygiène publique
de France,
Chevalier de la Légion d'Honneur,*

qui nous a fait le grand honneur d'accepter la prési-
dence de cette thèse ; qu'il trouve ici l'expression
de ma respectueuse gratitude.

A Monsieur le Docteur FREDERIC BORDAS,

*Directeur du Laboratoire d'Hygiène hydrologique et
Climatologique à l'Institut d'Hydrologie et de
Climatologie,*

Professeur suppléant au Collège de France,

Membre du Conseil supérieur d'Hygiène Publique,

Commandeur de la Légion d'Honneur,

qui nous a suggéré le sujet de cette thèse et nous a
guidés de son affectueuse sollicitude; qu'il
veuille accepter ici l'hommage de ma sincère et
respectueuse reconnaissance.

A mes Maîtres de l'Externat des hôpitaux de Paris :

*M. le D^r GARNIER, Professeur agrégé à la
Faculté de Médecine, médecin de l'Hô-
pital Lariboisière;*

*M. le D^r SEBILEAU, Professeur à la Faculté de
Médecine, Chirurgien de l'Hôpital La-
riboisière, otorhinolaryngologiste des
hôpitaux;*

M. le D^r MACE, accoucheur de l'Hôtel-Dieu;

*M. le D^r PRUVOST, médecin de l'Hôpital de
la Charité;*

*M. le D^r HARET, radiologiste de l'Hôpital
Lariboisière;*

*M. le D^r TINEL, médecin de l'Hôpital de la
Charité;*

*M. le D^r PROUST, professeur agrégé à la
Faculté de Médecine, chirurgien de l'Hô-
pital Laënnec.*

A TOUS MES MAÎTRES
DES FACULTÉS DE MÉDECINE
ET DES FACULTÉS DES SCIENCES
DE PARIS ET DE STRASBOURG.

INTRODUCTION

Jusqu'à une époque toute récente, une antique vénération n'osait s'attaquer à percer le mystère de la composition et de l'origine de l'eau thermale: c'était le fruit d'une longue tradition qui, plusieurs fois millénaire, entourait d'une terreur religieuse les « Fontes Sacræ » des Romains, connues d'ailleurs bien avant eux, que vénéraient les premiers occupants de notre terrain, mais qu'ils surent les premiers utiliser rationnellement : l'Etablissement Thermal, les Thermes Romains d'Aix-les-Bains n'étaient-ils pas plus vastes que l'Etablissement actuel ?

La haute température, l'émergence brutale et inattendue de ces eaux, leur activité thérapeutique célèbre dès l'antiquité leur assignait un pouvoir miraculeux, et les flancs féconds de la roche d'où elles jaillissaient étaient tout naturellement reconnus comme le siège de la Divinité : aussi était-il sacrilège de souiller ou de détériorer la source thermale, et de chercher à en pénétrer l'origine surnaturelle: c'est à ce respect des foules que nous devons la pérennité de la

plupart de nos émergences thermales, mais aussi d'avoir longtemps attendu l'épreuve de l'investigation scientifique.

C'était une croyance courante, admise encore par beaucoup de personnes, d'ailleurs, qu'une source d'eau ordinaire ou d'eau thermale laisse couler un liquide de composition immuable; la constance de la température de certaines eaux chaudes, malgré toute variation diurne ou saisonnière, laisse bien entendre que leur composition est comme leur thermalité immuable.

Aussi, l'observation — maintes fois constatée — de certaines altérations de la température de l'eau minérale a-t-elle fréquemment inquiété les usagers, qui en sont venus à se demander quelles en étaient les causes, craignant avec juste raison que ces variations d'un phénomène physique n'entraînent une altération des propriétés cliniques de l'eau thermale; en effet, faut-il que le médecin, chargé d'en fixer pour chaque malade la prescription thérapeutique, soit assuré de posséder là un moyen d'action constant, toujours à peu près semblable à lui-même et qui demeure tel à sa disposition, en quantité comme en qualité : la médecine actuelle ne se satisfait plus de ces drogues séculaires de composition mal définie et mal connue, dont les formules approximatives, transmises par les générations, tenaient le plus clair de leur valeur de leur mystère et de leur imprécision. Elle veut appli-

quer des formules nettement définies, parfaitement connues, toujours identiques à elles-mêmes, et qui attaquent la variété de chaque cas pathologique par l'unité d'un seul moyen thérapeutique, telles que sont nos grandes formules usuelles.

Mettre en évidence les altérations des qualités physiques des Eaux d'Aix, dire quelle en est l'amplitude exacte, et chercher à en déceler les causes : telle était la tâche que s'était fixée la Mission de l'Institut d'Hydrologie, dirigée par le Professeur BORDAS; dire quels sont les moyens de protection de ces sources, telle était la conclusion de ces observations, qui l'ont amené à rechercher l'origine et le parcours souterrain de ces sources : c'est l'exposé sommaire de ces études qui vont faire l'objet de cette thèse.

CHAPITRE PREMIER

LES SOURCES CHAUDES D'AIX

Le bassin hydrothermal d'Aix comprend deux sources principales, *Alun* et *Soufre*, émergeant l'une et l'autre du calcaire urgonien fissuré recouvert par des alluvions glaciaires.

Alun débouche à la cote 283, dans une grotte naturelle — longuement décrite par BONJEAN (1) et depuis par la plupart des auteurs s'étant occupés d'Aix — par une diaclase ascendante, à la température de 44-47° et avec un débit voisin de 27 litres/seconde.

Soufre, moins importante, se manifeste à 150 m. au sud-ouest de la première, dans l'infrastructure de l'Etablissement thermal, à la cote 267 ; elle jaillit à une température de 43-45°, avec un débit de 10 litres-seconde (autant qu'on peut en juger).

Constatée de toute antiquité, la thermalité de ces eaux était bien connue et probablement utilisée par

(1) BONJEAN, *Analyse chimique des Eaux minérales d'Aix-en-Savoie*, chez Puthod, Chambéry, 1838.

les populations primitives, qui n'ignoraient pas l'action des bains chauds sur certaines affections — telles que les rhumatismes, les douleurs articulaires, les séquelles de blessures, affections fréquentes s'il en dût être au début de notre humanité. Aussi, avant de connaître par l'expérience et la tradition les vertus d'une eau thermale, les premiers à la découvrir et à l'employer étaient fondés à lui attribuer, en même temps qu'une origine miraculeuse, des effets thérapeutiques; et aussi peut-on dire qu'il s'est fait une sorte d'assimilation entre ces termes d'eau thermale et d'eau minérale, à tel point qu'on trouve entre les deux plus d'un lien de parenté, une sorte d'équivalence, et qu'on peut communément les prendre un peu l'un pour l'autre.

C'est certainement la constatation de cette thermalité qui est l'origine du renom si justifié d'Aix-les-Bains; nul n'ignore quel fut le goût prononcé des Romains pour les bains chauds : aussi les voyons-nous, dès le 1^{er} siècle de notre ère, utiliser les sources déjà connues des Allobroges (1) et bâtir *Aquæ Gratianæ*,

(1) Bonjean rapporte que lors des fouilles précédant la construction de l'Etablissement thermal (1779), on reconnut l'existence de trois époques de construction, toutes trois superposées l'une à l'autre; on y trouva les restes de thermes romains et, au-dessous de ceux-ci, d'autres bains encore, qui remonteraient à une époque bien plus reculée. Toutes les assises de constructions thermales se distinguaient entre elles par leurs matériaux, leur type architectural, la différence de profondeur de leur enfouissement relatif, leur orientation particulière. On trouva près de la source d'alun plusieurs restes d'un bain de vapeur, et la profondeur où on les avait trouvés permettait d'affirmer l'importance de la surélévation postérieure du sol,

importante station thermique dont les restes subsistent core partiellement (1).

LES PREMIÈRES OBSERVATIONS DE TEMPÉRATURE

Dès le XVIII^e siècle, des médecins et des chimistes tentaient de donner la composition analytique des sources d'Aix-les-Bains, et plongeaient dans leurs eaux les premiers thermomètres, que venaient d'inventer Fahrenheit et Réaumur (2). Ils trouvaient comme températures moyennes 35° Réaumur, 44° centigrades, 110° Fahrenheit.

Mais on ne tarda pas à noter que la température des eaux était sujette à des variations inconstantes et d'amplitude inégale; BONJEAN, un pharmacien de Chambéry, qui donna en 1838 une analyse chimique

exhaussement tel qu'on a oublié les anciens thermes et que, depuis le moyen âge, on a construit, bâti et élevé de nouvelles constructions thermales au-dessus ou à côté des précédents. Cette surélévation du sol paraissait due, pour les anciens auteurs, à des sables charriés et à des débordements accidentels de la rivière d'Aix (le ru des Moulins) qui n'auraient pas été déblayés de l'époque romaine à nos jours.

(1) Tels sont des restes de balnearium et de vaporarium découverts dans les fondations de la ville d'Aix et qui devaient être alimentés par la source d'alun, ainsi que de nombreuses inscriptions votives ou funéraires.

(2) La plus ancienne étude médicale des eaux d'Aix-les-Bains remonte à CABIAS (1523); au XVIII^e siècle, une série d'analyses et d'observations physiques et chimiques furent faites par FANTONI (1743), DAQUIN (*Analyse des Eaux thermales d'Aix-en-Savoie*, chez Garrin, Chambéry, 1772-1777); BONVOISIN (1780); SOCQUET, *Analyse des Eaux thermales d'Aix-en-Savoie*, chez Chéaz, Chambéry, 1803.

des eaux très complète pour l'époque, accompagnée d'observations du plus haut intérêt sur leur captation et leur origine, avait remarqué la variation de leurs températures, dont il donnait, comme moyennes : 43°12 pour Soufre et 45° pour Alun. Il avait observé, dès 1830, d'importantes variations de température, accompagnées d'altérations évidentes de la composition. Ainsi le 6 novembre 1836, la source Soufre était descendue à 38° et n'avait presque plus de caractère sulfureux ; le 10 suivant, elle était remontée à 41°, tandis que l'eau d'Alun, qui était descendue en même temps à 34°, remontait, le lendemain même, à 40°.

En 1829, à la suite de fortes pluies en août et septembre, les températures de Soufre et d'Alun s'étaient abaissées respectivement de 45° à 30° et 44° à 35°5, tandis qu'elles remontèrent, au début d'octobre, jusqu'à 37°5 pour Alun et 40° pour Soufre, pour s'abaisser de nouveau à 36° et 31° le 10 octobre de la même année.

BONJEAN en déduisait que, si l'eau de Soufre abaissait sa température de quelques degrés après de fortes pluies, il lui fallait un certain temps pour revenir à sa chaleur normale, tandis que l'eau d'Alun, dont l'abaissement de température était plus rapide, remontait aussi plus rapidement dès que les causes du refroidissement avaient cessé.

BONJEAN attribuait très justement cette altération au mélange d'eaux étrangères, pluviales ou glaciaires; à la même époque, le D^r DESPINE, qui fut médecin à Aix pendant un demi-siècle, avait déjà cherché l'alimentation des sources sur le haut plateau du Revard (1); il pensait que le refroidissement des eaux thermales était dû à une filtration plus ou moins considérable des eaux provenant de la fonte de neiges ou de grandes et longues averses, qui seraient venues envahir les eaux thermales; la cause de la rapidité et de l'importance du refroidissement des eaux d'Alun (beaucoup plus nette que celle de Soufre) tenait au passage d'une grande quantité d'eau perturbatrice par les bétoures du Haut-Revard (2).

Pendant tout le xix^e siècle, l'abaissement de la température aux griffons, à la suite de fortes pluies ou de la fonte des neiges, fut un fait de constatation courante, fréquemment corrélatif d'une augmentation notable du débit; les Annales du Service des Mines témoignent des craintes continuelles des usagers, relativement à la possibilité de voir les griffons ther-

(1) Les Docteurs DESPINE et VIDAL, l'abbé PARAMELLE (1836) reconnurent l'existence de gouffres et de bétoures dans ces montagnes calcaires dominant Aix, et pensaient que le refroidissement des eaux d'alun, beaucoup plus prompt que celui des eaux de soufre tenait à la facilité du passage des eaux pluviales par ces orifices que Bonjean appelle des « soupiraux à vapeur » et qui avaient été dénomés par Cabias des « puits d'orage ».

(2) Cf. le *Bulletin des Eaux d'Aix-en-Savoie*, par les Docteurs DESPINE frères et fils.

maux prendre un nouveau régime qui ne permettrait plus leur application directe au traitement thermal. Il serait inutile et fastidieux de citer tous ces rapports, qui tous rappellent des altérations du même ordre — baisse de la température des eaux au printemps, après une saison pluvieuse, disparition de l'odeur sulfureuse, etc. (1) ; certains incriminèrent plus précisément le Ru des Moulins et décidèrent de l'entreprise de mesures de protection.

Mais récemment, après la guerre 1914-18, ce furent les variations de la température des eaux, que l'Etablissement thermal faisait prendre journallement depuis plusieurs années, qui motivèrent l'inquiétude de cette Administration et provoquèrent une première consultation du Service des Mines.

LES OBSERVATIONS RÉCENTES (1921-1923)

De décembre 1921 à novembre 1922, la courbe des températures (que l'Etablissement thermal faisait prendre depuis plusieurs années, toujours par le même agent et au même endroit, à l'aide d'un thermomètre à maxima) de la source d'Alun présentait de nombreuses irrégularités; normalement inférieure de 2° aux températures du griffon thermal, distant de

(1) Voir plus loin, chapitre VIII. p. 460

150 mètres et oscillant habituellement entre 42° et 45°, cette température s'est abaissée jusqu'à 34°, tandis que celle de la source de Soufre, plus profonde, n'avait subi que des variations de plus faible importance. Enfin, pendant les hivers 1921-22 et 1922-23, d'importantes et continuelles variations de la température des eaux appelèrent l'attention de la Commission consultative de l'Etablissement thermal d'Aix et motivèrent, après consultation du Service des Mines, l'intervention de l'Institut d'Hydrologie.

LA MISSION DE L'INSTITUT D'HYDROLOGIE

Le Service des Mines, consulté au sujet de ces phénomènes, préconisait, par un rapport du 10 mai 1922, des mesures de détail destinées à améliorer et à assurer autant que possible l'étanchéité des points sensibles voisins des sources, mais reconnaissait l'impossibilité de supprimer complètement les infiltrations d'eaux froides, à moins de travaux fort importants et qui ne pouvaient être entrepris qu'après une étude préalable (1); c'est alors que le Conseil supérieur d'hygiène décida de confier à l'Institut d'Hydrologie l'ensemble des recherches destinées à préciser la cause des perturbations, et que celui-ci décida :

(1) Voir plus loin, page 172.

1° de faire, sur les variations des sources d'Aix, une étude spécialisée grâce à l'emploi de méthodes scientifiques et d'appareils adéquats;

2° une étude de la circulation souterraine des eaux thermales, afin de décider si la cause des perturbations ne pourrait pas être rapporté à l'origine même de ces eaux.

LES CONSTATATIONS PRÉLIMINAIRES

A) Ordre de grandeur des facteurs de la thermalité

On peut prendre, d'après les données recueillies à Aix et à l'observatoire voisin d'Albertville, le chiffre de 10° comme moyenne thermométrique annuelle de l'atmosphère; or, les eaux viennent, au jour, à une température de 46°. Peut-on calculer quel est le terme minimum de la descente de ces eaux? C'est facile: on sait, en effet, que la température des couches du sol s'élève progressivement à mesure que l'on s'enfonce et que la valeur de ce degré géothermique, quoique variable, oscille entre 30 et 35 mètres; si l'on prend pour la valeur du degré géothermique le chiffre de 35 mètres, on voit que les eaux supposées avoir une température moyenne de 46° ont dû descendre, au moins, à une profondeur de :

$$(46 - 10) \ 35 = 1.260 \text{ mètres.}$$

D'autre part, si, d'après les constatations faites depuis longtemps à Aix, on leur assigne un débit moyen de 35 litres/seconde, et qu'on appelle :

Q ce débit,

ω la section du canal d'ascension,

V la vitesse avec laquelle les eaux parcourent ce canal;

On peut appliquer la relation simple qui dit que le débit est fonction de la vitesse multipliée par la section du canal parcouru, ou :

$$Q = \omega V,$$

où ω nous est inconnu; mais il n'est pas déraisonnable de supposer que les diaclases, par lesquelles les eaux remontent à la surface, aient une section de 0 m² 20 (ce qui correspondrait, par exemple, à une fente longitudinale de 1 m. de longueur sur 20 centimètres de largeur); on en déduira la vitesse probable de remontée des eaux :

$$\omega = Q : V, \quad 0 \text{ m}^3 \text{ 035} : 0 \text{ m}^2 \text{ 02} = 0,17 \text{ m./seconde.}$$

Si on assigne une hauteur (voir plus haut) de 1.260 mètres à la colonne ascensionnelle, celle-ci sera parcourue en :

$$1.260 : 0,17 = 7.400'', \text{ ou } 2 \text{ heures } 6' \text{ } 40''.$$

M. DE LAUNAY (1), étudiant la loi d'échauffement théorique d'un circuit hydrothermal, estime qu'en

(1) L. DE LAUNAY, *Les Sources thermo-minérales*, Paris, 1899.

moyenne la vitesse de descente des eaux est 30 fois plus faible que celle de la remontée; si l'on applique ici ce coefficient, on en déduit que les eaux superficielles se seraient infiltrées avec la vitesse de :

$$0,17 : 30 = 0,005 \text{ mètre/seconde,}$$

soit 400 mètres en une journée, chiffre admissible en un territoire calcaire fissuré.

Comme on peut supposer que le territoire d'absorption des eaux météoriques se trouve sur la zone comprise entre le Revard et la Magne, située à une moyenne de 10 kilomètres des sources minérales, on peut raisonnablement donner à ces eaux une circulation réelle d'une trentaine de kilomètres. Prenant ce chiffre, la durée de la phase de descente des eaux sera de :

$$30 : 0,4 = 75 \text{ jours.}$$

tandis que la phase de remontée calculée plus haut n'a exigé que deux heures.

Aussi peut-on en déduire que les infiltrations participant au circuit de descente sont étrangères à toute variation rapide de la source thermique : leur faible vitesse de propagation les force en effet à bénéficier du réchauffement progressif de la descente, jusqu'à identification thermique complète.

Toute tentative susceptible de modifier le régime des eaux à l'origine de leur descente, comme le reboisement qui avait été proposé, est donc sans intérêt

pour pallier aux courtes variations thermiques enregistrées.

Par contre, c'est dans la phase ascendante et au voisinage de la surface que se produisent les apports suspects, c'est-à-dire aux abords immédiats du griffon; on a tout de suite pensé au Pont de Bois, et une expérience faite en novembre 1922 par le professeur BORDAS, en période de perturbation thermique, montre que ce ravin peut être incriminé, au moins dans la souillure de la source Soufre.

B) *L'observation météorologique.* — Il semblait déjà probable de pouvoir trouver un parallélisme entre les précipitations atmosphérique et les altérations des sources; au début de la mission de l'Institut d'Hydrologie, il n'y avait pas d'observations pluviométriques : mais en comparant le graphique des altérations des sources constatées par la simple notation des températures et celui des chutes météoriques survenues pendant la même période à la station la plus proche (Albertville), on trouve un synchronisme suffisamment net pour être assuré de leur interdépendance.

C) *Considérations théoriques sur les variations comparées de la thermalité du débit et de la minéralisation.* — De ces observations, on pouvait déjà remarquer que les altérations ne correspondent pas

jour pour jour à la période pluvieuse, mais la suivent avec un retard qui, de quelques jours, tient à la capacité du manteau alluvionnaire recouvrant l'urgonien. Dès que les formations glaciaires sont gorgées d'eau, les pluies se traduisent par des altérations presque immédiates; le professeur BORDAS schématise ce phénomène en une comparaison familière, mais saisissante : l'alluvion glaciaire est une éponge posée sur une écumoire : le calcaire urgonien.

Dans cette région, aux abords immédiats des griffons thermaux, les eaux douces et froides qui altèrent la thermalité et la minéralisation, dans le court trajet qui les sépare de la diaclase thermique, n'ont pas eu le temps de subir de modifications appréciables.

Aussi peut-on se livrer aux raisonnements suivants, si l'on désigne par

D_1 le débit de cette source qui est devenue $D + d$,

T la température — —

M la minéralisation — —

d le débit de l'eau froide perturbante;

t la température —

m la minéralisation —

T_1 la température de la source thermique au moment de son refroidissement;

M_1 la minéralisation de la source thermique au moment de son refroidissement;

D_1 le début de cette source qui est devenue $D + d$, on pourra écrire que la chaleur perdue par l'eau chaude équivaut la chaleur gagnée par l'eau froide :

$$D (T - T_1) = d (T - t)$$

Chaleur perdue = chaleur gagnée.

et
$$D (M - M_1) = d (M_1 - m).$$

Par conséquent, quelques mesures — débit, température, minéralisation — permettent de déceler les deux caractéristiques capitales de l'eau perturbante : t sa température et m sa minéralisation; on pourra en déduire si les eaux de surface envahissent brusquement les eaux thermales, ou si celles-ci ne sont que progressivement altérées par des venues d'eau douce sous des conditions particulières de pression hydrostatique : d'ailleurs, les deux phénomènes peuvent s'additionner.

D) *Programme des recherches.* — Il s'agissait donc de mesurer quotidiennement un certain nombre de variables :

1° un Élément physique : *la température*, de l'eau douce et surtout de l'eau thermale;

2° un Élément météorologique : température de l'air, pluviosité, insolation, etc.;

3° des Éléments hydrolagiques : *le débit*;

4° enfin, au lieu de s'adresser aux longues et difficiles analyses de la minéralisation, il est préférable d'employer la méthode de la *résistivité*, qui permet

d'avoir la valeur de la minéralisation totale d'une eau par le chiffre de sa résistance spécifique au passage du courant électrique.

Lorsque nous aurons vu quels ont été les instruments et quelles ont été les méthodes qui ont permis à l'Institut d'Hydrologie de mener à bien la mission qu'il avait accepté de remplir, nous verrons sur quel terrain a été poursuivie cette mission, comment l'Institut d'Hydrologie a pu utiliser les connaissances déjà acquises et les hypothèses théoriques sur l'origine des eaux thermales, puis nous passerons aux résultats obtenus.

CHAPITRE II

LES MÉTHODES ET LES APPAREILS (*suite*)

a) *L'observation des températures*

Quelle que soit la fréquence avec laquelle on devait surveiller l'eau thermale, par des mesures aussi nombreuses que possible, on ne pouvait laisser à demeure un expérimentateur auprès de la source. Il était très possible que certaines variations brusques, de peu de durée, se produisissent la nuit, et restassent ainsi inappréciables: aussi l'Institut d'Hydrologie a-t-il résolument choisi, pour l'observation constante de l'eau de source, les *thermomètres enregistreurs*, tandis que, pour les observations de détail, uniques ou peu nombreuses, portant par exemple sur un puits ou un cours d'eau voisin du griffon, on se contentait d'un bon *thermomètre ordinaire à mercure*.

Les thermomètres à mercure. — Il existe de ceux-ci une infinité de modèles qui, pour la plupart donnent d'excellents résultats pourvu qu'on fasse la lecture rapidement, en évitant que la température de l'air ait

le temps d'influencer en plus ou en moins le chiffre indiquant la température de l'eau; une méthode très simple, et qui fut très fréquemment employée, consiste à prélever au puits ou à la source un seau d'eau contenant une dizaine de litres, à le remonter rapidement et à y plonger aussitôt le thermomètre : la température de l'eau n'a pas eu le temps d'être influencée par celle de l'air, et le chiffre obtenu est excellent.

Toutefois, en présence de cours d'eaux rapides, ou d'un débit trop faible, il fallut recourir à certains artifices permettant de réduire au minimum les causes d'erreur : ainsi a-t-on pu se servir, suivant les indications de M. GUILLERD (1), d'un thermomètre enfermé dans un étui de bois susceptible de s'ouvrir longitudinalement, et muni à sa base d'un réservoir de cuivre, avec trous d'entrée de l'eau où plonge le réservoir du thermomètre. Cet instrument permet de remonter un certain volume d'eau qui évite les influences extérieures pendant la lecture de la température.

Naturellement, on s'est également servi, pour les mesures de températures de l'eau, des différents modèles de thermomètres à minima et à maxima (2), qui

(1) GUILLERD, *Notions d'hydrologie appliquées à l'Hygiène*, chez Béranger, Paris, 1922, page 95.

(2) Voir chapitre V, page 83.

peuvent donner d'excellents résultats, mais l'observation continue ne peut être véritablement réalisée que par

Les appareils enregistreurs.

Il en existe deux types généraux :

1° les *enregistreurs électriques*;

2° les *enregistreurs à tension de vapeur saturée*, qui ont de plus l'avantage de permettre l'observation des températures à distance. Ces deux sortes d'appareils sont d'ailleurs excellents, et ont pu rendre de grands services par leur précision.

L'enregistrement électrique.

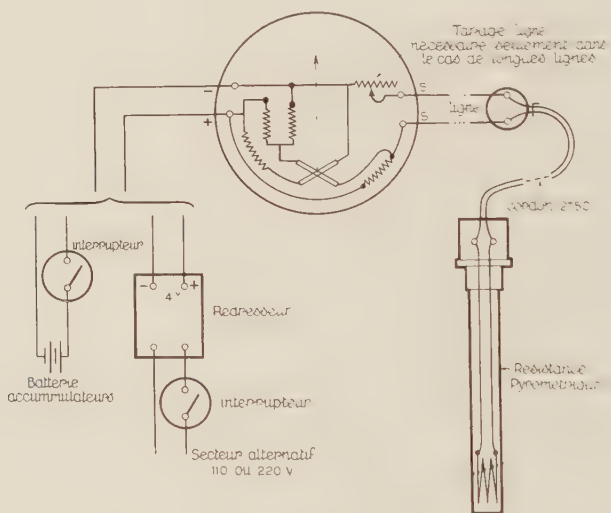
L'appareil employé fut une sonde pyrométrique construite sous les indications de M. TOUPLAIN (1), pouvant enregistrer des variations de l'ordre du centième de degré.

Ce pyromètre à résistance est basé sur le principe du Pont de Wheatstone dont le galvanomètre est ici employé comme un « appareil déviant » en fonction des températures.

Ensuite on plonge la canne pyrométrique dans l'eau dont on veut déterminer la température. Cette canne pyrométrique renferme les deux résistances variables

(1) TOUPLAIN, *Déterminations physico-chimiques à effectuer sur le terrain*, chez Lafolye, Vannes, 1926, pages 21-23.

qui se trouvent situées entre deux tubes concentriques très minces placés à son extrémité. Ce montage augmente la surface de contact avec le liquide à étudier et réduit l'inertie des résistances, rendant les indications plus rapides que celles d'un thermomètre à mercure, et donnant une sensibilité normale du $1/20$ de degré, pouvant aller jusqu'à $1/1.000$; aussi conçoit-on l'importance de cette sensibilité, permettant de déceler le passage de filets d'eau étrangère à la source examinée.

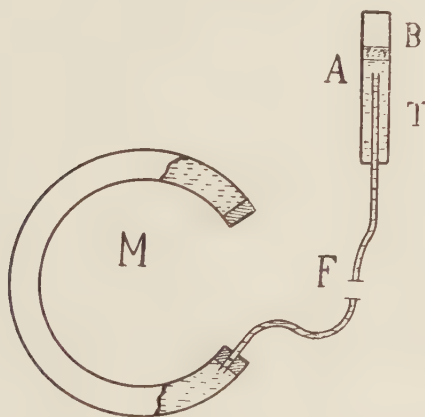


Montage du Pyromètre à résistance

Enregistrement à tension de vapeur. — Cette méthode, due à J.-B. FOURNIER, a été utilisée par la Mission de l'Institut d'Hydrologie à Aix-les-Bains; aussi nous arrêtera-t-elle plus particulièrement.

Elle est basée sur la propriété physique des vapeurs saturées : à température égale, les vapeurs de tous les liquides volatils ne possèdent pas la même force élastique; il y a, pour une température déterminée, une limite à la tension de cette vapeur, qui pour cette température est indépendante de la pression, ce qui permet donc de l'utiliser pour l'évaluation des températures.

L'un des grands intérêts de cette utilisation réside en ce que, à la différence des thermomètres à dilatation, les variations de capacité de l'enveloppe thermométrique n'ont aucune influence sur les indications



thermométriques; il suffit de connaître, pour la lecture des températures, quelle est pour chacune d'entre elles la tension de vapeur saturée correspondante.

L'Institut d'Hydrologie a employé un appareil très sensible, dont les avantages sont basés sur la localisation rigoureuse de la partie sensible du réservoir et la suppression des effets thermiques sur toutes les parties de l'appareil, sauf sur le réservoir. Schématiquement, l'appareil ainsi conçu comporte :

1° une cartouche métallique renfermant le liquide sensible, et que l'on plonge dans l'eau à expérimenter (T) ;

2° un tube métallique très fin F contenant un liquide de tension nulle. La vapeur du premier liquide pousse le second, qui agit à la façon d'un piston sur le bras de levier d'un style; celui-ci inscrit ses déplacements sur un cylindre enregistreur.

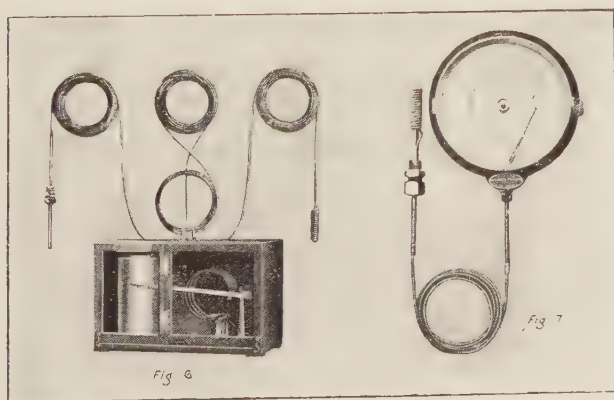
Pratiquement, on choisit un organe moteur d'élasticité invariable, en l'espèce un tube manométrique Bourdon M se déformant d'une quantité déterminée sous une pression donnée; cet organe est relié par un flexible de longueur déterminée au centre d'un réservoir R, qui est l'organe sensible. Le réservoir et le flexible sont d'abord remplis du liquide intermédiaire, en l'espèce la glycérine, dont la tension de vapeur est à peu près nulle, et au-dessus duquel on verse le second liquide, non miscible au premier et dont la tension de vapeur est très élevée; ce second liquide, qui varie suivant les températures à observer, sera, par exemple, l'éther de pétrole, dont les variations de tension

de vapeur seront transmises par le liquide intermédiaire, à la façon d'un piston hydraulique, à l'organe moteur faisant se déplacer l'aiguille indicatrice sur un cadran : rien n'est plus simple d'adapter ce système très sensible à un rôle enregistreur en faisant transmettre les variations de pression qui amplifient les variations de températures réelles par un style inscripteur placé devant un tambour enregistreur rotatif.

Cet appareil a rendu les plus grands services en permettant le prélèvement automatique des échantillons, et il présente d'autre part sur les thermomètres à dilatation et les pyromètres électriques un certain nombre d'avantages qui ont provoqué son emploi à Aix-les-Bains.

Avantages du téléthermomètre à tension de vapeur.

— 1° Il dispense des corrections inhérentes au fait



que toutes les autres variétés de thermomètre n'indiquent pas en réalité la température exacte du milieu où ils sont plongés : en effet, la température indiquée est une résultante des températures auxquelles les diverses parties de l'appareil sont soumises, et l'enveloppe thermométrique, réservoir ou conduite à distance, est sujette à des phénomènes de dilatation partiels qu'il est impossible d'éviter, car il n'y a pas de substance dont le coefficient de dilatation soit pratiquement nul. Ainsi les appareils à dilatation présentent constamment une modification de la capacité intérieure se traduisant par un déplacement parasite de l'organe indicateur (aiguille ou niveau du mercure), tandis que les appareils électriques sont sujets à l'érouissage progressif du métal, qui entraîne une variation parasite de la résistance électrique. Par conséquent, on est obligé de tenir compte de ces phénomènes en faisant des corrections après chaque lecture de température ou chaque série de lectures dans un appareil à marche continue et en réétalonnant l'appareil après un certain temps d'usage : tous ces inconvénients sont supprimés dans le thermomètre à tension de vapeur où le réservoir R est la seule partie sensible de l'appareil, qui mesure la température réelle du milieu à explorer. Tout le reste de l'appareil est situé en dehors du milieu : l'absence d'effets thermiques est dû à ce qu'on mesure non la température elle-même, mais la tension de vapeur fonction de cette

température et de ce principe de physique que la pression dans une enceinte contenant un mélange de plusieurs liquides non nuisibles est toujours égale à la plus grande des tensions composantes (1).

2° En conséquence, on peut modifier à volonté la capacité interne de chacun des éléments sans modifier la pression de l'agent et, par suite, la température : le réservoir et le tube flexible peuvent donc subir des déformations, on peut donner au flexible la longueur nécessaire et toute variation de la température extérieure, peut bien influer sur la capacité du réservoir, puisque la pression extérieure ne variera pas.

3° On peut retourner le réservoir sans craindre que le liquide intérieur ne s'échappe.

4° On n'a pas à craindre l'influence de la pression atmosphérique, car le tube flexible et l'organe moteur peuvent résister à une pression de 50 kilos.

Il n'est guère à signaler de difficultés qu'en la différence de niveau entre la position du réservoir et l'organe moteur des inscriptions thermométriques, dont on doit tenir compte : cette différence doit être connue

(1) Dans un appareil destiné à mesurer des températures allant de -20 à $+40$, où le liquide intermédiaire est de la glycérine et le liquide sensible de l'acide carbonique anhydre, la pression dans le réservoir sera toujours celle de la tension maxima de l'acide carbonique : il faudrait pour qu'il en fut autrement, que la tension de vapeur de la glycérine devienne égale à celle de l'acide carbonique et porter celui-ci à une température de 500° ; mais on peut encore tenir le flexible à 300° et la cartouche dans la glace sans que l'aiguille enregistreuse quitte le 0° .

pour le remplissage du tube et des réservoirs, afin de régler la feuille d'enregistrement des températures ; en effet, si le réservoir est au-dessus de l'enregistreur, le liquide enfermé à l'intérieur du tube flexible transmet une pression à l'organe moteur, proportionnelle à la différence de niveau, mais qui est peu sensible pour une différence de niveau de cinq mètres (1).

Le prélèvement automatique des échantillons est possible avec l'enregistreur à tension de vapeur saturée, et permet de suivre pas à pas les modifications qui peuvent survenir dans la composition de l'eau thermale, évitant ainsi les difficultés que l'on rencontre en pratique pour les prélèvements d'eau au moment voulu, quel que soit le zèle et la diligence du personnel employé.

Le thermo-enregistreur est muni d'un avertisseur électrique commandé par son stylet inscripteur ; cet avertisseur est un système à échappement, faisant contact dans une cupule contenant du mercure ; ce dispositif supprime les résistances de contact qui se produisent lorsqu'on se sert de l'aiguille de l'enregistreur comme plot de fermeture du courant, et évite aussi les retards d'enregistrement dus au calage partiel de l'aiguille.

(1) Si on fait subir un changement de peu d'importance aux conditions d'établissement de l'appareil, il est facile de corriger les inscriptions du style au moyen d'une clé de réglage.

Le prélèvement de l'eau est effectué dès que la perturbation de la source est signalée par l'enregistreur thermométrique; cette opération s'opère par l'intermédiaire d'une trompe de Villiers (1) modifiée sous les indications de MM. BORDAS et TOUPLAIN; cette trompe fonctionne sous pression réduite de 0,80 à 1 mètre d'eau, et est alimentée par l'eau contenue dans un flacon A de cinq litres, et qui s'écoule à travers un tuyau de caoutchouc assez rigide ayant 12 mm. de diamètre intérieur, fixé à la tubulure placée au bas du flacon; en position d'attente, ce tuyau est relevé et ne permet pas l'écoulement de l'eau motrice, étant ramené au-dessus du niveau de l'eau du flacon A.

Le fonctionnement automatique de l'appareil est dû à un système de bascule à déclenchement électrique C (2); le contact électrique arme un électro-ai-

(1) La modification a consisté à ajouter à la partie inférieure de la trompe, un talon à retour d'eau.

(2) L'appareil à déclenchement électrique comprend deux parties :

1° un système de bascule;

2° un appareillage électrique;

La bascule proprement dite se compose d'un fléau horizontal muni d'un petit chariot porte caoutchouc qui peut se déplacer longitudinalement et faire équilibre à un contrepoids de réglage qui change le second bras de levier, plus court que le premier.

L'équilibre du système est établi de manière que le premier bras porte-caoutchouc présente un excès de poids (150 gr. environ) par rapport à la force exercée sur l'autre bras du levier, maintenu dans une position horizontale par un système d'arrêt; celui-ci consiste à appuyer sur l'extrémité du bras libre le talon de la partie verticale d'une équerre métallique articulée autour d'un axe fixe.

A l'extrémité de la partie horizontale de cette équerre s'attache une petite chaînette, qui aboutit à l'armature d'un relai électrique placé au-dessus.

mant qui, faisant pivoter autour d'une de ses arêtes une console métallique, libère le tube de caoutchouc de son point d'attachage, provoquant ainsi l'amorçage de la trompe qui aspire dans un flacon (F) l'eau de la source à travers le tube T qui a une longueur d'environ 1 mètre. Ce même électro-aimant est relié à des piles sèches et dans le circuit est intercalé le contact avertisseur de l'enregistreur D de températures.

A ce moment du prélèvement, l'électro-aimant allume une lampe témoin au néon, allumage produit par une pointe isolante en ébonite, que porte à sa partie inférieure l'armature de l'électro-aimant et qui appuie sur une lame élastique pouvant vibrer sur une seconde lame quand le courant passe; ces lames produisent un contact intermittent allumant la lampe témoin (qui peut être montée si possible sur le secteur d'éclairage, la lumière de cette lampe rendue oscillante prévient que l'appareil de prélèvement fonctionne, tandis qu'après opération sa lumière reste fixe). Un interrupteur spécial à mercure *a*, placé dans la fiole A qui alimente la trompe, arrête le courant de piles dès que l'échantillon est prélevé.

Depuis 1924, deux thermomètres enregistreurs de ce type sont disposés, l'un sur la source d'Alun, l'autre sur celle de Soufre, et leurs résultats, pendant sept années, ont permis l'étude précise de la variation de température de l'eau thermale.

CHAPITRE III

LES MÉTHODES ET LES APPAREILS (*suite*)

b) *La mesure des débits*

Évalué à 20 litres/seconde pour chaque source au début du XIX^e siècle par FRANCŒUR, le débit des eaux d'Aix est actuellement de 27 litres/seconde à Alun et 10 litres/seconde à Soufre, aussi approximativement qu'on le sache. *

La mesure du débit en effet présente de grandes difficultés pratiques, étant donné les formes très variées de l'écoulement des eaux; cette question, très délicate et du ressort de techniciens spécialisés, ne peut être envisagée qu'au point de vue de l'étude des appareils manométriques, et spécialement de ceux qui ont servi aux études de la mission de l'Institut d'Hydrologie à Aix-les-Bains.

Il n'est pas aisé d'évaluer le niveau du puits où l'on pompe l'eau minérale, car celui-ci varie au fur et à mesure du pompage, mais il est plus facile de

calculer le débit de l'eau débordant d'une cavité rocheuse ou d'une vasque artificielle; quels que soient les procédés de captage, l'eau est presque toujours dirigée par un tuyau ou un caniveau de dimensions régulières et connues : c'est donc à l'émergence des griffons qu'il était possible de mesurer ce débit.

La quantité d'eau débitée pendant l'unité de temps par une conduite est égale au produit de la section mouillée de la conduite par la vitesse du liquide :

$$Q \text{ litres/seconde} = V \text{ mètres/seconde} \times S \text{ m}^2.$$

L'évaluation de la vitesse est l'élément délicat du problème; il existe un certain nombre d'appareils qui se proposent de donner cette évaluation; les uns — flotteurs ou moulinets hydrométriques — n'ont pas été employés à Aix-les-Bains; la mission de l'Institut se servit en effet uniquement, de 1922 à 1928, de différents manomètres tous basés sur le principe du tube de PITOT.

Le tube de PITOT. — On sait que, dans un liquide ou un gaz en mouvement, on distingue deux sortes de pression : la pression dynamique totale et la pression morte ou statique; la différence entre chacune correspond à la pression vive due à la vitesse du fluide.

Schématiquement, le tube de PITOT est simplement un tube de verre coudé à angle droit dont l'orifice inférieur reçoit directement les filets liquides. L'eau s'élève alors dans la branche verticale et dépasse le

plan d'une hauteur h qui représente la pression vive correspondant à la vitesse du liquide en mouvement.

Le calcul de la vitesse est basé sur le principe de TORRICELLI, loi physique qui régit l'écoulement des liquides et qui fut découverte expérimentalement par celui-ci :

« Quand un liquide s'échappe par un orifice percé en mince paroi, sa vitesse, à la sortie de cet orifice, est égale à la vitesse d'un corps qui tomberait en chute libre dans le vide, depuis la surface libre jusqu'au centre de gravité de l'orifice; elle est donnée par la relation :

$$V = \sqrt{2 g h},$$

où h est la distance verticale du centre de gravité de l'orifice au niveau libre du liquide, et g l'attraction de la pesanteur. »

Cet appareil très simple peut fournir des indications sur la vitesse des liquides mais est sujet à plusieurs causes d'erreur : clapotage de l'eau contre le tube, variation de h suivant son inclinaison, capillarité, perte de charge, etc. : aussi a-t-on également employé des appareils plus perfectionnés dérivant du même principe.

Le tube de DARCY a la forme d'un tube en Ω dont la partie supérieure porte un robinet; chaque branche du tube est recourbée à angle droit à sa partie inférieure, mais en sens opposé; l'extrémité de chaque

tube a 1 mm. 1/2 de diamètre. Ce système de tubes est fixé sur une planchette graduée qui s'oriente d'elle-même dans le sens du courant de l'eau où on la plonge; on voit alors monter dans l'un des tubes l'eau à une certaine hauteur a au-dessus de son plan d'écoulement: c'est celui qui reçoit directement les filets d'eau en mouvement; dans le second tube, au contraire, qui est dirigé en sens inverse du courant, l'eau s'abaisse d'une hauteur b au-dessous du même plan d'écoulement. Si on aspire l'eau par un robinet placé à la partie supérieure du tube, on remonte les niveaux sans en changer la différence, ce qui permet de les amener suffisamment haut pour que la lecture se fasse facilement; on peut encore fermer le robinet inférieur R et sortir tout l'appareil de l'eau pour faire la lecture. En définitive, la différence de niveau entre les tubes correspond à la hauteur où serait montée l'eau dans un tube de PITOT unique : $a + b = h$.

Quant à la vitesse du liquide, on la déduit de la valeur de h d'après la formule de TORRICELLI :

$$V = m \sqrt{g h},$$

où m est un coefficient particulier calculé pour chaque appareil par son constructeur et donné avec lui.

Le tube de RITTER, un perfectionnement du système de Darcy, se compose essentiellement de deux tubes de verre verticaux communiquant à leur partie supérieure par un tube métallique et formant le mano-

mètre proprement dit, monté sur une planchette divisée. Les extrémités inférieures de ce tube manométrique communiquent, par l'intermédiaire d'un joint de caoutchouc C, aux ajutages métalliques du schéma de RITTER formés de deux tubes recourbés à 90° , l'un formant un ajutage dynamique qui reçoit directement les filets d'eau, auquel il est ouvert perpendiculairement, l'autre un ajutage statique dont l'ouverture est parallèle au courant d'eau. Les orifices de ces ajutages ont 2 mm. de diamètre et sont assez éloignés des deux branches verticales de l'appareil, afin d'éviter l'influence des remous qui se produisent contre celles-ci.

RITTER a ajouté un petit manchon (M) assez long, fixé autour de l'ouverture de l'ajutage statique pour forcer les filets d'eau à passer parallèlement à l'orifice, ce qui a pour effet d'éliminer l'action perturbatrice des filets obliques et, par ce moyen, d'éliminer directement la pression statique; on évite ainsi de déterminer le coefficient (m) particulier à chaque appareil (1) : il suffit d'appliquer directement la formule de TORRICELLI et des tables constituées spécialement donnent directement la formule de V en fonction de h

L'instrument se fixe, pour les expériences, à une tige de fer autour de laquelle, grâce à un système d'attache, il peut librement tourner et s'orienter de lui-même parallèlement au courant, de façon que les ori-

fices inférieurs se présentent toujours face au fil de l'eau.

La pression dynamique ou pression vive est donnée par l'ajutage qui reçoit directement le courant; le niveau du liquide dans le tube communiquant avec l'ajutage statique est exactement celui du liquide dans lequel l'appareil est plongé, tandis que le niveau dans le tube correspondant à l'ajutage dynamique sera plus élevé par suite de l'action de la vitesse du courant.

Une échelle en cuivre divisée en centimètres est placée entre les deux tubes de façon à permettre la lecture des hauteurs de liquide dans chacun d'eux : c'est la différence de niveau dans les deux tubes qui sert à déterminer la vitesse du courant par application de la formule de TORRICELLI.

Pour utiliser l'instrument, une fois que celui-ci est fixé dans la conduite à étudier, on ouvre le robinet inférieur E en tirant l'un des cordons, et quand le niveau de l'eau ainsi introduit dans ces tubes s'est bien établi, on tire un second cordon qui ferme le robinet. On n'a plus qu'à remonter l'instrument et lire sur l'échelle la hauteur des deux colonnes liquides h et h' .

Si on veut immerger complètement l'appareil dans l'eau, il n'y a pas à craindre de différence de pression puisqu'on peut comprimer de l'air introduit par le robinet supérieur dans les deux tubes qui communiquent par leur partie supérieure, et sont soumis à la même pression qui s'exerce sur eux.

Si, inversement, l'appareil doit servir à mesurer la vitesse de l'eau à sa surface, on aspire l'air contenu dans les tubes, afin d'élever le niveau de l'eau au-dessus du robinet inférieur.

Inconvénients des manomètres.

Le manomètre ordinaire à eau, quel que soit son système et la précision à laquelle on atteigne, n'a pas la même sensibilité pour les différentes vitesses de liquide; l'instrument devient peu précis lorsqu'il s'agit de mesurer des vitesses inférieures à un mètre par seconde; ces imperfections ont conduit M. TOUPLAIN à construire un manomètre à double effet, qui fonctionne indifféremment comme manomètre ordinaire ou différentiel : il possède donc, dans tous les cas, une grande sensibilité et permet d'amplifier à volonté la mesure de h en choisissant convenablement les liquides manométriques (1).

LE MANOMÈTRE A DOUBLE EFFET

1° *Principe du dispositif différentiel.*

Qu'on retourne un tube en U de telle sorte que ses extrémités plongent respectivement dans deux vases remplis d'eau, dont les niveaux soient sur un même plan horizontal AB ; si la partie supérieure du

(1) Cf. TOUPLAIN, *Les déterminations physico-chimiques à effectuer sur le terrain*, chez Lafolye, à Vannes, 1926, pages 9 à 15.

tube en U porte une tubulure à robinet, on peut y verser un liquide plus léger que l'eau, qui se répartira de chaque côté du tube et restera au-dessus de l'eau dans chacune des deux branches. Par aspiration et par l'intermédiaire du robinet précité on soulèvera l'eau et le liquide plus léger jusqu'à ce que celui-ci dépasse le robinet. La pression étant la même de chaque côté du tube, la ligne de séparation des liquides du manomètre se trouve au même niveau : c'est ce dispositif qui constitue un *manomètre différentiel à deux liquides*.

Si on exerce une pression (P) à la surface de l'eau d'un des deux vases et une pression (p) à la surface du second vase, il se produit une dénivellation du plan de séparation des deux liquides contenus dans les deux branches.

Soient :

h = la différence des niveaux, elle correspond à la différence des pressions ($P - p$). D'après la formule établie pour les manomètres différentiels, on sait que h est proportionnel à ($P - p$) et inversement proportionnel à la différence de densités ($D - d$) des liquides,

$$\text{ou} \quad h = (P - p) : (D - d)$$

Dès lors, si : D est la densité de l'eau,
 d celle du second liquide plus léger,
on peut se rendre compte de la sensibilité que l'on

peut donner à l'instrument par le choix du second liquide manométrique. Plus la valeur de d se rapproche de D , plus on augmente la valeur de h pour atteindre à la limite maximum $D = d$, ou $h = \infty$, c'est-à-dire qu'on arriverait au siphonage des liquides manométriques (1).

Description du manomètre différentiel. — Cet appareil se compose d'un tube recourbé à deux branches ayant 7 mm. de diamètre intérieur et environ 37 centimètres de longueur; ce tube porte de chaque côté :

1° à la partie inférieure, deux petites ampoules de garde a et b de 15 mm. de diamètre;

2° à la partie supérieure, un robinet à trois voies R qui permet de faire communiquer le tube avec deux petits réservoirs A et B d'une capacité de 40 cm³ terminé par un goulot dans lequel on peut fixer un bouchon traversé par un petit tube de verre.

Cet appareil, complètement en verre, est fixé sur une planchette qui porte :

1° deux réglettes fixées, l'une à droite, l'autre à gauche du tube manométrique, divisées de bas en haut en millimètres et qui servent aux lectures lorsque l'ap-

(1) Soit l'eau de densité $D = 1$ et comme liquide différentiel le pétrole $d = 8$

$$\frac{P - p}{0,2} = h$$

autrement dit, pour une différence de pression $P - p = 1$ cm, le pétrole donne une amplification de 5.

pareil fonctionne comme manomètre ordinaire à eau;
2° une réglette, placée entre les deux branches du



tube en U, est utilisée pour les lectures différentielles.

Les divisions sont espacées plus ou moins, selon les liquides employés et donnent directement la valeur de h en millimètres. Enfin, ce manomètre est relié par ses extrémités a et b au dispositif des tubes statique et dynamique de RITTER.

Fonctionnement du manomètre différentiel. — Lorsqu'on désire mesurer la vitesse d'écoulement d'un liquide, le manomètre est fixé bien verticalement, et les extrémités sont reliées à l'aide de tubes de caoutchouc aux deux tubes de Ritter que l'on plonge dans l'eau à étudier. Ici, deux cas peuvent se présenter.

Premier cas : *Vitesse supérieure à 1 m./sec.* — Le robinet R est manœuvré de façon à isoler l'ampoule B et à mettre en communication l'ampoule A avec le tube manométrique. On aspire l'eau dans le manomètre au moyen du petit tube placé dans le goulot de A, de telle sorte que le robinet R étant fermé les niveaux dans chaque branche du tube soient autant que possible équidistants du centre de l'échelle manométrique.

La différence entre les divisions lues à droite et celles lues à gauche donne la pression vive en hauteur d'eau h correspondant à la vitesse d'écoulement du liquide en mouvement.

Il faut faire attention à ce que les gaz contenus dans l'eau peuvent gagner la partie supérieure du manomètre et faire baisser les niveaux, qu'il suffit de remonter en aspirant l'eau par le tube fixé à l'ampoule A.

Deuxième cas : *Vitesse inférieure à 1 m./sec.* —

L'appareil fonctionne alors comme manomètre différentiel; à cet effet, au moyen du robinet à trois voies R, on isole l'ampoule A, puis on aspire l'eau par l'ampoule B jusqu'au dessus de la naissance du robinet qu'on ferme aussitôt. On verse dans B le liquide différentiel (éther de pétrole coloré en rouge par une matière colorante quelconque extraite des goudrons de houille et soluble dans le pétrole). Puis on ouvre le robinet R afin de faire couler le pétrole lentement de chaque côté du tube manométrique, de façon que les plans de séparation des liquides dans chaque branche du tube soient sensiblement équidistants du 0 de l'échelle centrale du manomètre.

En ce cas, on additionne les lectures faites au-dessus et au-dessous du zéro. Les divisions de l'échelle centrale donnent directement la valeur de h en hauteur d'eau, mais, bien entendu, avec amplification.

En résumé, le manomètre différentiel à deux liquides a l'avantage, outre la facilité de son fonctionnement et le peu de calculs qu'il exige, de permettre la mesure de toutes les vitesses de l'eau : aussi a-t-il rendu de grands services et a-t-il été fréquemment employé à Aix avant l'installation des appareils enregistreurs.

MANOMÈTRE DIFFÉRENTIEL A AIR SOUS PRESSION

Le même appareil a subi, pour servir tout particulièrement aux essais d'Aix-les-Bains, un perfectionne-

ment consistant en l'adjonction d'une arrivée d'air comprimé entre le manomètre et les tubes de Pitot ; l'air sous pression est réglé pour sortir bulle à bulle aux extrémités des ajutages statique et dynamique ; il équilibre ainsi les pressions hydrauliques et les transmet au manomètre.

L'envoi de l'air assure les avantages suivants :

1° Les réceptions de pressions sont meilleures, grâce à la compressibilité des bulles d'air que par les molécules liquides du dispositif ordinaire ;

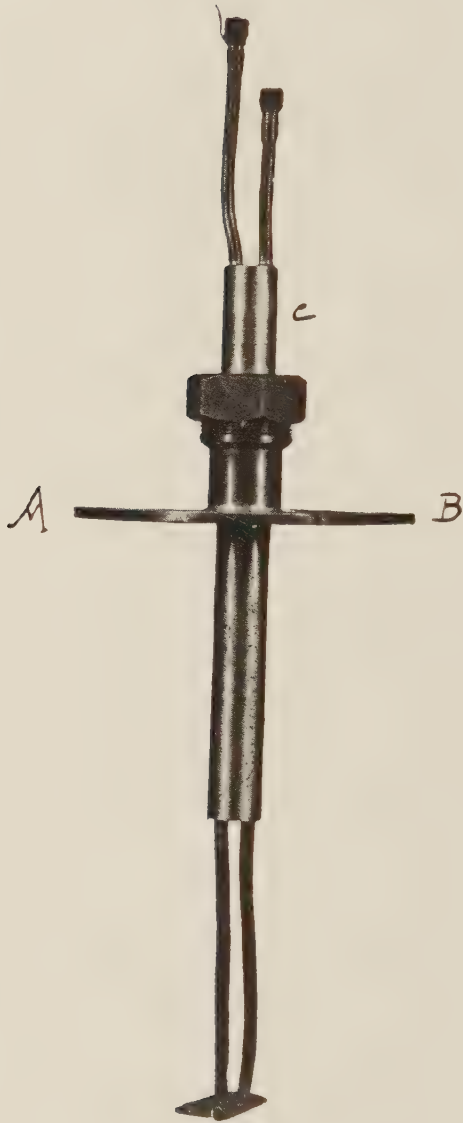
2° Il supprime l'influence des gaz dégagés de l'eau minérale qui influencent les colonnes liquides et, par suite, les mesures ;

3° Il évite la présence des algues pouvant se fixer aux extrémités des ajutages.

Cet appareil, qui permet la mesure très exacte et très rapide du débit, est en fonctions à Aix depuis 1928 ; l'importance des renseignements qu'il a fournis à la mission de l'Institut d'Hydrologie nous oblige d'en donner une description détaillée, encore qu'aussi succincte que possible.

Description du manomètre différentiel à air sous pression

L'ensemble des appareils du manomètre différentiel à air sous pression comprend :



1° un système d'ajutages, dont l'extrémité a un diamètre intérieur de 5 mm., statique et dynamique de type Pitot, dont les deux tubes sont contenus dans un cylindre de cuivre C qu'un joint à presse-étoupe maintient dans la tubulure de la plaque AB; cette plaque est elle-même fixée sur un manchon cylindrique de cuivre qu'on introduit dans le tuyau d'écoulement de l'eau à étudier.

La forme cylindrique de manchon permet de donner à la conduite une section momentanément régulière; le joint à presse-étoupe permet d'orienter et d'enfoncer comme on le désire les ajutages dans l'eau de la conduite, et de faire des mesures à différentes profondeurs, de façon à déterminer le point où on rencontre les filets animés d'une vitesse moyenne;

2° une bouteille d'air comprimé munie d'un détenteur de pression;

3° Le tableau manométrique, représentée par une plaque de bois fixée bien verticalement à un mur, et où l'on trouve :

a) les tubes manométriques — où on introduit, selon les cas, de l'eau, du mercure, et où, pour les faibles pressions (2 à 3 centimètres d'eau), on superpose dans les branches rétrécies de l'eau et du pétrole, ou de l'essence de térébenthine et de l'alcool;

b) les tubes-témoins à boules, placés à droite et à gauche des tubes manométriques et qui contiennent de l'eau ou un liquide quelconque (à tension de vapeur négligeable) ;

c) un robinet à trois voies R comme celui du manomètre différentiel à deux liquides, situés à la partie supérieure de l'appareil, et surmonté de deux ampoules destinées à recevoir les liquides manométriques ;

d) à droite et à gauche des tubes manométriques, des pinces à vis V et V', qui règlent l'arrivée de l'air comprimé dans les tubes à boules ;

e) une pince à vis V'' à la partie inférieure des tubes manométriques et qui règle le niveau du liquide dans ces tubes ;

f) trois réglettes ; les deux réglettes extérieures donnent les pressions en centimètres et millimètres ; la réglette centrale (qui n'est utilisée que pour l'usage du manomètre à deux liquides) donne directement des indications en pressions d'eau : cette réglette centrale peut se déplacer dans le sens de sa longueur, pour fixer le zéro des niveaux, et doit être remplacée (à moins de corrections de lecture lorsqu'on change la nature des liquides manométriques.

Utilisation du manomètre à air sous pression

On peut employer avec ce manomètre, soit un seul, soit deux liquides; mais de toutes façons, toute lecture doit être précédée de la vérification de l'état de marche de l'appareil.

Une opération préliminaire consiste dans la vérification du zéro : lorsqu'on met le manomètre en liaison avec les ajutages plongés dans un récipient d'eau parfaitement immobile, et en admettant l'air comprimé, les niveaux du liquide manométrique doivent se maintenir constamment sur un plan horizontal, quelle que soit la profondeur atteinte dans l'eau par les ajutages plongés bien verticalement. Au cas contraire, il faut rectifier la distance verticale comprise entre les extrémités inférieures des ajutages.

Une seconde précaution est de vérifier les divisions des échelles graduées à l'aide d'ajutages étalonnés (1).

*Manomètre à air sous pression
et un seul liquide*

Dans ce premier cas, on verse le liquide par une seule des ampoules supérieures, que le robinet à trois voies introduit dans les tubes manométriques, de façon que les niveaux s'établissent vers le milieu des échelles. On obtient leur horizontalité en manœuvrant la pince à vis V'' (et en n'oubliant pas de laisser le robinet R ouvert, en communication avec l'air extérieur).

Manomètre à air comprimé et deux liquides

On utilise alors les deux ampoules supérieures où on verse les deux liquides manométriques de densités très différentes (eau et pétrole); on procède, pour remplir le premier des deux tubes manométriques, comme il a été indiqué plus haut; ensuite, en laissant ouverts la pince V" et le robinet R, celui-ci communiquant avec la seconde ampoule supérieure et avec les tubes manométriques, on aspire le premier liquide déjà introduit et on établit son niveau dans le bas de l'ampoule, un peu au-dessous du robinet R; on le ferme alors, et on verse dans la seconde ampoule supérieure le second liquide plus léger et préalablement coloré. Puis, pour remplir les tubes manométriques, on ouvre très légèrement le robinet R jusqu'à obtenir au milieu de l'échelle graduée la limite de séparation des deux liquides.

(1) On prend un ajutage du type Pitot absolument semblable à celui de l'appareil, mais où les deux tubes, statique et dynamique, indépendants l'un de l'autre, peuvent glisser verticalement l'un contre l'autre; le tube dynamique B porte à sa partie supérieure une échelle graduée munie d'un vernier, et le tube statique A un index amovible venant s'appuyer sur cette échelle. On place verticalement cet appareil dans un récipient d'eau immobile, et on fait le zéro manométrique. En plaçant l'index sur le zéro de l'échelle, on peut faire varier la distance verticale entre les extrémités des tubes et créer ainsi des pressions différentes auxquelles doivent correspondre les divisions de l'échelle du manomètre qu'on va utiliser; au cas contraire, il faut établir une courbe de concordance.

Utilisation de l'air comprimé

Cette manœuvre est la même, qu'il s'agisse de l'emploi de deux ou d'un seul liquide; on ferme le robinet R, la pince V'' et les pinces à vis supérieures; on ouvre les pinces à vis V et V' et on envoie par le tube C l'air comprimé dont le passage est réglé dans les tubes à boules, de façon qu'il ne sorte que bulle à bulle aux extrémités des tubes de PITOT, ce qui permet d'équilibrer d'un côté la pression statique, de l'autre la pression totale.

Enfin, on ouvre les pinces à vis du manomètre, et la différence de pression h qu'il enregistre correspond à la relation : $h = V^2 : 2 g$,
d'où on peut calculer la vitesse moyenne lorsqu'on a placé correctement l'extrémité des tubes de PITOT en direction et en profondeur.

Résultats donnés par le manomètre à air comprimé

Le débit est connu immédiatement par cet appareil très sensible, sans calculs, si l'on emploie les tables de PRONY, qui donnent la valeur de la relation $Q = V S$.

On a avantage d'employer le manomètre à deux liquides pour de très faibles vitesses, où il donne alors des indications extrêmement sensibles. Employé par l'Institut d'Hydrologie depuis 1928 à Aix-les-Bains, ses avantages ont été exposés plus haut.

Manomètre enregistreur

Comme pour l'exploration de la thermalité, il était du plus grand intérêt d'avoir constamment à la source l'indication de la valeur du débit de l'eau en train de s'écouler : ainsi est-on averti du début d'une variation dès qu'elle survient, ou d'une subite et très courte variation de débit.

Il existe déjà un certain nombre de ces appareils, spécialisés pour les forts débits (1), mais peu adéquats à mesurer de faibles pressions différentielles; en effet, ces manomètres à membranes métalliques perdent de leur sensibilité lorsqu'elles reçoivent simultanément des pressions internes et externes, et il faut mieux employer des membranes indépendantes.

A Aix-les-Bains, l'enregistrement a été réalisé très simplement par un manomètre enregistreur double qui peut mesurer des pressions de quelques millimètres : sa sensibilité tient à l'emploi d'un récepteur formé de coquilles métalliques très minces et d'une grande flexibilité; celles-ci sont enfermées dans les boîtes métalliques étanches A et B placées sous le

(1) Tels sont l'enregistreur de débit de PIETTE, basé sur la mesure de la dépression produite par le passage du fluide à travers un tube intercalé sur la conduite, dépression mesurée par un manomètre différentiel très robuste, et l'enregistreur « Lea Recorder Arba », basé sur le principe des diversions hydrostatiques.

socle de l'appareil manométrique communiquant avec l'enceinte dont on veut connaître la pression (1).

Schématiquement, cet appareil ainsi réalisé se compose de :

1° le manomètre double comprenant les boîtes A et B de réception de pressions qui sont mises respectivement en communication avec les tubes T et T', connexes aux ajutages de Pitot;

2° ceux-ci portent chacun une tubulure latérale munie d'un robinet permettant de faire arriver par tt' de l'air comprimé que l'on règle convenablement pour vaincre la pression exercée aux extrémités des tubes T et T' plongés dans l'eau à étudier. Le réglage doit être fait de telle sorte que l'air doit sortir bulle à bulle et doucement. L'équilibre des pressions s'établit donc entre les boîtes réceptrices A et B, et les pressions exercées par l'eau aux extrémités des tubes T et T' : ces pressions s'inscrivent séparément et simultanément sur la feuille unique placée sur le tambour de l'appareil, dont la rotation est complète en 26 heures, ce qui permet un enregistrement plein pendant 24 heures et laisse deux heures de battement pour le changement de feuille. Si a représente la pression totale exercée à l'extrémité du tube T', la différence $a - b$ représentera la valeur de h en hauteur d'eau,

(1) On a préféré, pour amortir les aiguilles d'inscription du manomètre, relier les boîtes A et B au reste de l'appareil avec un caoutchouc demi-vide qu'on pince à volonté suivant le cas, plutôt que d'employer des amortisseurs à huile.

d'où on déduira la vitesse moyenne du liquide, d'après la formule de TORRICELLI .

Installation du manomètre enregistreur

Afin de se mettre dans les meilleures conditions d'observation, on a réalisé à Aix-les-Bains une installation très commode comprenant :

1° une petite cuvette B placée à un niveau inférieur à la source S et où celle-ci déverse son eau;

2° un tuyau de 250 mm. de diamètre que remplit le fonctionnement d'une vanne V; ainsi, l'écoulement se fait toujours à section pleine et sans provoquer de surcharge de l'eau du bassin d'alimentation;

3° une seconde cuvette B', qui reçoit l'eau du tuyau de conduite et se trouve placée en contre-bas, pour éviter les refoulements de la conduite;

4° en amont et en aval de l'ajutage manométrique M, deux ventouses v et v' pour l'évacuation des gaz dégagés par l'eau; le manomètre enregistreur est placé entre deux portions de conduite rectiligne dont la partie amont est au moins dix fois le diamètre de la conduite et la partie aval au moins cinq fois ce diamètre.

Ce système d'installation a permis d'obtenir un régime permanent et de donner les mêmes résultats que l'emmagasinage, dans un réservoir de dimensions connues, de la totalité du débit écoulé en un temps T.

Variations du niveau hydrostatique

A côté des variations du débit de la source, il était intéressant de connaître l'amplitude des oscillations de la nappe hydrostatique et la suivre d'après le niveau des puits et des émergences situés sur un certain périmètre tout autour des sources. On s'est servi de deux sortes d'appareils: les *limnigraphes*, qui sont des appareils enregistreurs actionnés par un flotteur, et les *hydromètres*.

Ceux-ci sont basés sur les variations de pression subies par une masse d'air déterminé suivant la hauteur du liquide qui la surmonte, et mesurées par un manomètre (dont les indications varient avec la densité du liquide, de l'air, d'où corrections si l'on a affaire à des eaux de minéralisations différentes). Comme on mesurait les variations de la nappe hydrostatique d'origine glaciaire et faiblement minérale, il n'y a d'ailleurs pas eu lieu d'effectuer ces corrections. Cet appareil peut être muni d'un avertisseur électrique, mais la connaissance des oscillations de la nappe n'avait tout de même pas l'intérêt de celle des altérations des eaux, et on n'a pas eu à l'utiliser.

Les observations les meilleures ont été faites avec l'hydromètre de RICHARD, dont la solidité permet une grande régularité d'enregistrement. Cet indicateur de

niveau est simplement composé d'une caisse en fonte percée de trous, contenant à l'intérieur une poire de caoutchouc à demi remplie d'air et reliée par un tube de cuivre avec un manomètre enregistreur. La caisse en fonte est descendue à la profondeur voulue (jusqu'à 15 mètres d'eau) dans l'eau qui exerce une pression sur l'air contenu dans la poche; la pression atmosphérique et la température sont sans action et l'observation peut se faire à cent mètres de distance.

Ce manomètre a été fréquemment employé pendant la campagne de l'Institut d'hydrologie.

CHAPITRE IV

LES MÉTHODES ET LES APPAREILS (*suite*)

c) *La résistivité.*

L'épreuve de la conductibilité électrique est d'une importance essentielle dans l'étude d'une eau thermale, à la fois par sa rapidité, la facilité de son exécution et par l'importance des renseignements qu'elle donne sur sa composition physico-chimique; son inverse, la résistivité — c'est elle que l'on mesure, qui fait l'objet de toutes les déterminations — est en effet le reflet de la minéralisation totale de l'eau. Evitant les lenteurs et les difficultés de l'analyse chimique, cette méthode a donné sur l'origine, la circulation des eaux, la possibilité d'une pollution et son ordre de grandeur, les résultats les plus rapides.

On sait en effet qu'une eau est d'autant plus conductrice de l'électricité qu'elle a dissous plus de matières salines empruntées aux roches au travers desquelles elle a tracé son parcours souterrain; l'eau distillée est très faiblement conductrice; plus une eau est

minéralisée, plus elle devient conductrice : la conductibilité électrique d'une eau est donc le reflet fidèle de sa charge en sels dissous; elle est l'expression de sa minéralisation globale; c'est une notion équivalente à celle de l'extrait sec, mais acquis par une mesure simple, rapide et par conséquent facilement renouvelable.

De fait, cette méthode constitue une mesure à la fois de la stabilité, du régime et de signalement des variations de l'eau déterminant dans ce dernier cas l'opportunité d'une analyse plus complète; elle sert à la fois à surveiller le régime hydrologique de l'eau thermale et son exploitation elle-même. Aussi bien, la mission de l'Institut d'Hydrologie à Aix-les-Bains s'est-elle constamment servi de cette excellente méthode qu'emploient maintenant journellement la plupart des services d'hygiène.

Ainsi que cela s'est produit aux eaux d'Aix-les-Bains (ce qui fut la cause des études que nous résumons ici), on peut craindre la possibilité du mélange de l'eau minérale avec des eaux douces étrangères, froides, souvent polluées du fait que ces eaux parasites sont proches de la surface, à l'approche du point d'émergence. En effet, la diaclase thermale qui chemine jusqu'à la surface peut s'anastomoser aux diaclases d'eau douce et froide, et le mélange peut être provoqué par une surélévation momentanée du niveau hydrostatique de l'eau douce à la suite de fortes pluies;

son origine peut au contraire avoir pour cause la dépression du niveau hydrostatique de l'eau minérale sous l'action des pompages nécessités par la saison thermale.

Les deux natures d'eau n'ont pas la même minéralisation; elles diffèrent par conséquent de conductibilité électrique; la connaissance fréquente de celle-ci pour l'eau minérale signalera donc ces perturbations, ces possibilités de mélange, et des calculs simples, faisant état des températures et des résistances permettent de fixer l'origine et le débit des eaux parasites s'infiltrant dans le griffon thermal (1).

Naturellement, la conductibilité électrique des eaux n'est pas une propriété qui tombe sous le sens comme la thermalité, et ce n'est qu'en 1897 qu'on trouve pour la première fois l'indication de la méthode dans une dissertation inaugurale de LEHNERT (2), qui trouve une relation entre la conductibilité des eaux et leurs extraits secs, se livre à des expériences et en conclut à une proportionnalité approchée et suffisante pour donner d'utiles renseignements.

Quelques années plus tard, MULLER (3) expose les avantages d'une méthode basée sur les mesures de la

(1) GUILLERD, *Protection géologique et sanitaire des eaux thermo-minérales* dans « Annales d'Hygiène publique, 1925.

(2) GUILLERD, *Notions d'hydrologie appliquée à l'hygiène*, chez Béranger, à Paris, p. 161.

(3) Comptes rendus Académie des Sciences, page 1046.

sur les sources d'eau ordinaire ou thermale, de l'influence des saisons, du changement de débit à la suite de pluies abondantes, ou de sécheresse sur les sources d'eau ordinaire ou thermale ; on doit être, dit-il, en mesure de pouvoir faire des mesures fréquentes et répétées ; quand le débit de la source vient à varier, si une souillure accidentelle et ignorée peut l'avoir modifiée, il est très utile d'en avoir connaissance au plus vite pour parer au danger : c'est donc dans le but de déceler les variations de composition d'une eau minérale que MULLER a proposé l'étude des variations de conductibilité préconisant la méthode du courant alternatif et du téléphone, et à condition d'opérer à température constante, ce qui évite de s'astreindre à de longues corrections.

Depuis cette époque, les expérimentations se sont orientées vers l'utilisation de la méthode du Pont de Wheatstone.

Résistivité d'une solution.

On définit la résistance spécifique ou résistivité d'une solution la résistance que cette solution oppose, au passage d'un courant électrique sous une épaisseur de 1 cm. et une section de 1 cm.; la résisti-

tivité R est l'inverse de la conductivité : $1 : C = R$ (mesurée en ohms).

C'est toujours la résistivité, qui dépend non des molécules, mais de la quantité d'ions qu'une solution renferme, que l'on mesure pratiquement; on en déduit que, pour une eau minérale, la conductivité est directement proportionnelle à la quantité d'ions qu'elle renferme et que l'ionisation par dilution d'une eau minérale peut être mesurée par sa conductivité (ou toujours, par son inverse, la résistivité).

On connaît le schéma du Pont de Wheatstone : les deux pôles d'une pile sont reliés aux points A et C d'un circuit formé par deux dérivations, l'une constituée par les conducteurs AD DC de résistances respectives a et b , l'autre par les conducteurs AB BC de résistances c et d .

On peut faire varier ces résistances a , b , c , d de telle sorte que la différence de potentiel entre D et B soit nulle, c'est-à-dire que l'aiguille du galvanomètre marque 0, et qu'on ait la relation :

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$$

Connaissant donc trois des résistances, on peut en déduire la quatrième, l'inconnue cherchée; si par exemple l'inconnue est c :

$$c = d \times \frac{a}{b}$$

Les différents types d'appareils

KOHLRAUSCH, pour éviter l'électrolyse des solutions, a substitué au courant direct d'une pile le courant alternatif fourni par une bobine d'induction; le galvanomètre est remplacé par un téléphone; les deux résistances a et b sont constituées par un fil de platine iridié de 1 mètre de longueur, tendu entre A et C et placé au-dessus d'une règle divisée. Le point de contact OB est un curseur mobile sur AC susceptible de faire varier la valeur de a et b , qui sont lues directement sur la règle. On se donne la résistance d , par exemple, à l'aide d'une boîte de résistance R, tandis que celle à mesurer sera C par exemple; soit X cette résistance à mesurer constituée par une cuve à deux électrodes platinées où plonge un thermomètre, et qui contient l'eau à étudier.

Pour effectuer la mesure d'une résistance à la cuve d'une eau minérale, on amène la température de la cuve strictement à 18° et on note la position du curseur B sur le fil AC telle que le téléphone reste silencieux: en ce cas la différence de potentiel

entre O et B est nulle et :

$$\frac{c}{a} = \frac{R}{X}, \text{ d'où } X = R \frac{c}{d}$$

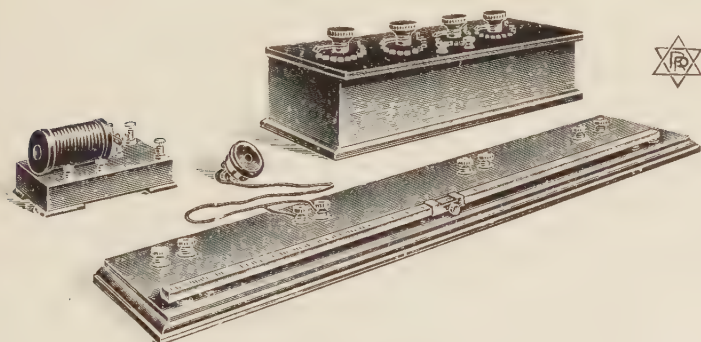
d'où on connaît la valeur de :

R par la boîte de résistance;

c

— par le calibrage du fil.

d



La règle de KOHLRAUSCH et ses accessoires.

X est la *résistance à la cuve*, chiffre qui dépend de la forme et des dimensions de celle-ci et qu'il est indispensable d'établir avec précision.

La résistance d'un conducteur de longueur l cm. et de surface S cm² est proportionnelle à la longueur et inversement proportionnelle à la surface; telle est la loi d'Ohm, qui ajoute que cette résistance est proportionnelle à la résistance spécifique ρ caractéris-

tique de la nature du conducteur, et qui est ici la tranche d'eau comprise entre les sections S et la distance l qui les sépare :

$$X = \frac{l}{S}, \quad \frac{S}{l} = X$$

S

Ce rapport — ainsi défini est le *coefficient de cuve*;
l

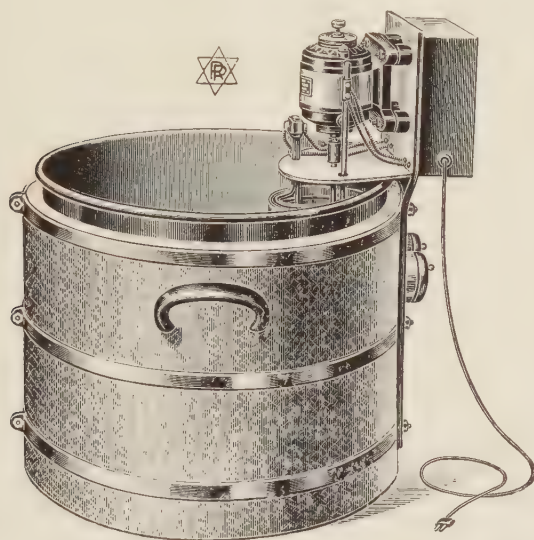
établi une fois pour toutes, il est caractéristique de chaque cuve employée, variant avec les électrodes, leur écartement, le volume d'eau, fixé aussi exactement que possible, qui a servi à faire la mesure et qui doit rester toujours le même au cours des essais (1).

Si les électrodes de la cuve avaient un écartement de 1 cm. et une section de 1 cm², la résistance à la cuve d'une eau minérale correspondrait pour une température T à sa résistance spécifique cherchée, c'est-à-dire à sa résistivité proprement dite; mais pratiquement les cuves ne remplissent pas ces conditions, il faut y remédier en multipliant la résistance à la

(1) En pratique, on détermine le coefficient de cuve S/e en utilisant une solution de chlorure de potassium à 0,5 % dont la résistivité spécifique à 18° est connue par les tables de Kohlrausch et est égale à 1.210 ω . Cette constante tient ainsi compte non seulement de l'écartement des électrodes ou de leurs dimensions, mais aussi de leur parallélisme, du volume d'eau dans la cuve, de la température, de la nature et de l'intensité du courant.

cuve par un coefficient K qu'on appelle constante de cuve et qui tient compte des conditions d'expérience.

On ne peut songer à utiliser sur le terrain l'appareil lage préconisé par KOHLRAUSCH, sommairement décrit plus haut, car il met en action un fil fragile sur une règle rigide, de 1 m. de large, encombrante; il oblige



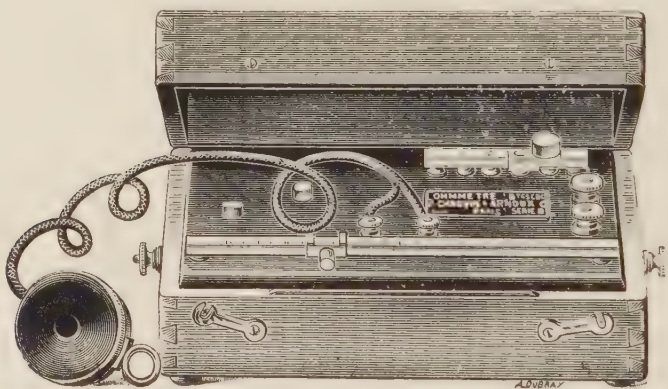
Type du Thermostat du montage de KOHLRAUSCH.

à opérer à 18° , et pour ce faire commodément, on s'est adressé le plus souvent à une petite cuve en verre mince, la cuve de DUTOIT, qui, si elle se prête facilement en raison de sa minceur aux réchauffements ou refroidissements nécessaires, est fragile et dont les électrodes noyées rendent indispensable la détermina-

tion du coefficient de cuve à l'aide d'une solution étalon.

Mesures de la résistivité électrique sur le terrain

Aussi MM. BORDAS et TOUPLAIN ont-ils fait construire un appareil robuste, aisément transportable, dont l'emploi s'est depuis généralisé et qui est parfaitement adapté à la mesure des résistivités électri-



ques sur ce terrain, c'est l'*audithomètre*, appareil construit pour les mesures de résistances polarisables comprise entre 0,1 ohm et 1 mégohm, offrant donc une marge très grande dans les mesures et de capacité faible, ce qui est le cas pour des solutions salines diluées qu'on a à mesurer dans l'étude des eaux thermales.

Cet appareil est bâti sur le plan général du KOHL-RAUSCH, et les modifications que MM. BORDAS et TOUTAIN y ont apporté permettent d'avoir, sous un petit volume, tout le matériel nécessaire à l'établissement des mesures.

L'*Audithomètre* offre l'aspect d'un coffret en noyer, fermé par une tablette d'ébonite qui supporte les dispositifs de lecture, à l'intérieur duquel on trouve :

1° la bobine d'induction; un petit volet mobile, placé sous le fond de la boîte permet d'accéder à son trembleur et de le régler pour que la bobine rende un son aigu;

2° les trois premières branches du pont de Wheatstone, qui sont constituées :

a) pour la première branche, par une résistance de comparaison réglable comportant quatre bobines indépendantes ayant respectivement 10, 100, 1.000, 10.000 ω et représentés à l'extérieur par quatre plots extérieurs numérotés 1, 2, 3, 4, disposés sur la tablette d'ébonite et commandés par un premier curseur mobile M ;

b) pour les 2^e et 3^e branches, par un cylindre rhéostat à enroulement spirale qu'un second curseur mobile N peut diviser en deux parties réglables; ce curseur traduit ses indications à la surface de la tablette sur une forte règle graduée métallique, de sec-

tion carrée, et séparant la résistance précédemment décrite en deux parties variables, soient c et d et la lecture sur la règle de la division où se trouve placé l'index du curseur indiqué aussitôt le rapport des ré-

c
sistances —.
 d

3° sur la tablette : la règle graduée, les plots des résistances 10, 100, 1.000, 10.000, et le bouton B du courant de pile.

4° Le téléphone est connecté en pont, sur les barres extérieures placées à la surface de la tablette.

5° Le couvercle de la boîte forme, à l'état d'ouverture, une seconde boîte où sont placés les piles et les accessoires de l'appareil de mesure : la cuve, le thermomètre, des linges pour essuyer l'appareil, etc.

6° Enfin la cuve à eau, qui forme la 4^e résistance de l'appareil, doit être de forme parallélépipédique (1), en ébonite, dont deux faces internes exactement parallèles reçoivent, étroitement appliquées contre elles, des plaques d'argent ou de cuivre argenté qui constituent les électrodes. Si le parallélisme des faces de la cuve est exact, on peut recourir à un simple calcul

(1) Prenons par exemple une cuve parallélépipédique dont les dimensions intérieures sont 8 cm. 92 sur 6 cm. 81, la hauteur totale, indifférente d'ailleurs, étant de 11 cm. 5.

Les électrodes sont appliquées sur les deux faces ayant 8 cm. 92 de large et sont séparées par la distance l de 6 cm. 81.

On mesure, à l'aide d'un ballon jaugé 200 cm³ de l'eau intéressée et on la verse dans la cuve où ils occupent une hauteur h qui sera donnée par :

géométrique pour la détermination du coefficient de cuve, autrement il faut procéder à cette détermination à l'aide d'une solution étalon de résistivité connue.

Exprimons la résistance spécifique ϱ en fonction de cette même variable :

$$\varrho_t = \frac{1}{\alpha t}$$

d'où

En désignant par A le facteur $1 + \alpha(t - 18)$, on a

$$h = \frac{200}{8,92 \times 6,81} = 3 \text{ cm. } 291$$

la surface S d'électrode mouillée sera donc :

$$S = 8,92 \times 3,291 = 29,355 \text{ cm}^2$$

et le coefficient de cuve :

$$C = \frac{S}{1} = \frac{29,355}{6,81} = 4,31$$

On comprend que l'on doit faire toutes les lectures avec 200 cm², sous peine de modifier le coefficient de cuve.

On obtient d'ailleurs exactement le même résultat avec une solution : étalon soit, par exemple, une solution étalon de résistance 2,351 ω ; deux lectures sur le fil ont donné :

à 47,7 pour R = 500

à 50,15 pour R = 550

100 — 47,7

$$\frac{47,7}{99,98 - 50,15} \times 500 \times C \text{ (coefficiente de cuve)} = 2,351$$

$$\frac{50,15}{50,15} \times 550 \times C = 2,351$$

d'où C = 4,31.

Il est évident qu'on peut faire la lecture du coefficient de cuve avec n'importe quel chiffre, ce qui change, c'est la surface S d'électrode mouillée; certains appareils contiennent dans leur couvercle une cuve permettant des mesures de 50 cm².

$$\varphi_t = \frac{\varphi_{18}}{A},$$

relation qui permet de ramener à 18° une détermination faite à t° les valeurs de A ont été calculées pour toutes les valeurs en dixièmes de degré comprises entre + 5 et + 25, α ayant été trouvé pour les eaux naturelles, voisin de 0,025 par PLEISSNER, à la suite d'une série de mesures.

La spécification des eaux par leur conductivité doit être regardée comme comparable à la détermination d'un point de fusion d'une substance quelconque.

Mieux que tout autre méthode physique, la conductivité permet de suivre les variations de composition des eaux, et prévenir aussitôt que possible de l'existence d'une altération de celles-ci; il faut d'ailleurs ne pas oublier que les eaux très peu minéralisées, lorsqu'elles sont agitées, ont leur conductibilité influencée par les phénomènes thermo-électriques et par les gaz de l'air, l'acide carbonique principalement; mais au delà d'une minéralisation de 0,300 gramme par litre, l'influence des gaz dissous est négligeable.

En tout cas, lorsqu'on opère sur une eau bouillie, filtrée et ramenée à son volume initial au moyen d'eau distillée pure, on obtient une détermination précise appelée conductibilité permanente.

C'est ce qu'on doit faire lorsque la cuve est de forme variable et qu'on emploie des électrodes noyées, fixes ou mobiles (qui présentent le désavantage de détermination des courants de connexion qui faussent les lectures), en argent platiné.

La manipulation doit être précédée de la vérification de la propreté des contacts, sur lesquels on doit passer un linge légèrement huilé avec une huile de vaseline, puis qu'on doit essuyer avec un linge sec et propre; cette opération facile pour les plots contacts devient un peu plus difficile pour atteindre la résistance placée sous le curseur, dans ce cas, on se trouvera bien d'un linge introduit dans la rainure à l'aide d'une petite boucle faite avec un fil de cuivre qui permet de la faire glisser.

En pressant sur le bouton B, à gauche de l'appareil, le courant de la pile est admis dans le circuit; par tâtonnements, on cherche la position du curseur qui correspond au silence (ou plutôt le minimum de résonance du téléphone); on fera des touches ménagées du bouton B après chaque déplacement du curseur (ces deux opérations, avec un peu d'habitude, se font de la même main). La lecture des divisions de la rè-

d

gle donne directement le rapport — et, en multipliant

c

ce chiffre par la valeur en ohms R du plot utilisé, on a directement la résistance à la cuve :

$$X = \frac{d}{c} \times R \times K, \quad K \text{ étant le coefficient de cuve}$$

précédemment calculé (1).

Il faut noter que les mesures varient si on ne s'est pas maintenu strictement à la température de 18° ; si il est impossible, ce qui est presque toujours le cas sur le terrain, il est préférable d'opérer sans se soucier des températures qui seront notées par un bon thermomètre gradué en $1/10$ de degré, immergé en permanence dans la cuve, et de procéder à la correction nécessaire pour ramener la lecture obtenue à 18° .

Cette correction est basée sur la remarque que la conductibilité électrique d'une eau est une fonction linéaire de la température, c'est-à-dire qu'elle varie avec la température.

(1) Les meilleures lectures sont celles faites vers le milieu de la règle.

CHAPITRE V

LES MÉTHODES ET LES APPAREILS (*suite*)

d) *L'observation météorologique*

Au début de la Mission de l'Institut d'Hydrologie, il n'y avait pas, dans la région d'Aix, de station météorologique, et toutes les observations climatiques que l'on possédait provenaient de la station d'Albertville, peu éloignée, mais tout de même située sous l'influence d'un climat alpin un peu différent.

Aussi créa-t-on une station météorologique, un véritable petit observatoire, à la cote 1552 du plateau du Revard, à une distance d'environ d'Aix-les-Bains; cette station est munie des appareils nécessaires à l'étude de la température et de l'humidité atmosphérique :

Ce sont :

un thermomètre à minima du type Rutherford;

un thermomètre à maxima de Negretti;

un thermomètre enregistreur du modèle courant;
un psychromètre;
un hygromètre enregistreur à cheveux;
un pluviomètre du type adopté par la Ville de Paris, destiné à recevoir les précipitations atmosphériques.

Enfin, on mesure également le temps d'insolation à l'aide d'un héliographe Campbell Stokes, et la quantité de neige reçue à l'aide d'un nivomètre, du même modèle que celui employé à l'Observatoire du Mont Saint-Bernard.

La direction du vent est notée par une girouette sensible, sa vitesse donnée par un anémomètre Robinson; la visibilité dans le plan horizontal est mesurée en notant divers repères situés à des distances connues, et dont on se rend compte de l'effacement par temps de brume légère.

L'ensemble de ces appareils est décrit dans des traités spéciaux; ils permettent des observations atmosphériques qui viennent en concordance avec les observations hydrologiques. (Voir Chap. IX.)

CHAPITRE VI

LE TERRAIN DES RECHERCHES;

ASPECT GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION D'AIX-LES-BAINS

Tales sunt aquæ qualis est terra per quam fluunt : c'est par cette citation de Pline qu'Imbeaux ouvre le chapitre de son ouvrage fondamental consacré aux qualités des eaux souterraines, exprimant ainsi l'intime corrélation entre les caractères d'une eau souterraine et ceux des couches géologiques qu'elle traverse et où elle séjourne plus ou moins longtemps, et sous une pression plus ou moins élevée. Aussi est-il nécessaire de situer le champ d'expériences sur lequel l'Institut d'Hydrologie, armé des méthodes décrites dans les précédents chapitres, a eu à exercer son activité.

La région d'Aix-les-Bains

Située sur la bordure des chaînes subalpines, la région d'Aix-les-Bains fait tectoniquement partie du

Massif des Bauges, dont un chaînon, partant d'Annecy, a formé la montagne du Semnoz et se continue obliquement, dans une direction Nord-Est-Sud-Ouest, par la crête du Mont Revard; ce chaînon s'oblique et, changeant complètement de direction, va former les petits massifs du Nivolet et du Mont Pennay, limitant une superficie semi-circulaire : le plateau du Revard ou des Déserts, que borde à l'Est la chaîne du Margeriaz; à l'Ouest, la molasse tertiaire, dans laquelle est creusé le lac du Bourget, supporte la ville d'Aix-les-Bains, bâtie sur un brachyanticlinal de dimensions réduites, qui n'est autre que la Roche du Roi.

La station d'Aix et le lac du Bourget se trouvent placés au milieu d'un vaste synclinal molassique, terminaison en coin aigu de la grande plaine molassique suisse, et que limitent à l'Ouest et à l'Est deux grands anticlinaux amenant au jour des terrains plus anciens, allant du Crétacé moyen au Jurassique inférieur. C'est, l'Ouest, la Dent du Chat, qui dresse ses abrupts aux bords mêmes du lac, sur toute sa rive occidentale à pic; à l'Est, le Revard, dont une portion de 15 kilomètres, de la vallée de Pragondran aux chalets-hôtels de Revard, nous intéressera plus particulièrement.

A l'est de la crête de cette ride anticlinale, s'étend un large plateau désert et sec, le synclinal des Déserts,

sans écoulement, que limitent au Sud le Nivolet et le Mont Pennay; à l'Est, une troisième ligne anticlinale la Magne; celle-ci, par son orientation oblique vers le Nord, se rapproche du Revard et forme avec lui un angle ouvert au Sud, qui termine en pointe le synclinal des Déserts et que parcourt le Ru Saint-François.

C'est sur ces régions ainsi trop sommairement décrites que s'est exercée l'activité de la mission de l'Institut d'Hydrologie; c'est là qu'on a recherché l'origine des eaux thermales d'Aix-les-Bains.

Entre les cimes du Revard et les rives tranquilles du lac, deux petits anticlinaux de détail accidentent le fond du synclinal mollassique; l'un — le plus important par ses dimensions — se poursuit sur une quinzaine de kilomètres, depuis Voglans jusqu'à Grésy, en passant par Tresserves, la ville d'Aix et Saint-Simon, dont nous n'aurons pas à nous occuper; l'autre, beaucoup moins étendu et découpé en une série de petits affleurements inégaux perçant la couverture oligocène, est l'anticlinal de la Roche du Roi; des assises urgoniennes de son flanc occidental sourdent les Eaux thermales.

A l'est de la ville d'Aix, en partie bâtie sur ces calcaires, une dépression comblée par les molasses oligocènes et miocènes, où la couche aquitanienne imperméable isole les eaux provenant des terrains tertiaires et secondaires, sépare sur une distance de 2 à 3 kilomètres ce petit anticlinal de la haute ride du Revard dont le flanc occidental, couché et renversé, en partie laminé, se dresse, sur quelques points limi-

tés comme un mur rocheux que franchissent de petites cascades.

Toute l'ossature du Revard, formé de crétacé inférieur uniquement, dresse, face à Aix, sa charnière anticlinale qui forme l'abrupt de la falaise, tandis que le flanc oriental peu incliné, subhorizontal, va s'enfoncer sous le synclinal tertiaire des Déserts.

Au sud de Mentens, le contact direct du Jurassique supérieur, qui domine au sud du Revard les bancs urgoniens redressés de la charnière anticlinale, a suggéré à différents auteurs l'hypothèse d'une faille, qui justement pourrait expliquer la remontée au jour des eaux thermales.

Enfin, toute la région entre lac et montagne est recouverte d'une pellicule d'alluvions glaciaires, d'épaisseur très variable et très inégale, et dont l'âge, également variable, a fait l'objet d'études patientes.

II. — *Résumé historique*

C'est aux longues recherches des nombreux géologues du XIX^e siècle que nous devons ces connaissances; les premières données acquises l'ont été par les vieux géologues de l'Académie de Savoie, Mgr BIL-

LIET (1), le chanoine RENDU (2), le chanoine CHAMOUSSET (3), Louis PILLET (4), qui nous donna en 1859 la première description géologique du bassin d'Aix et dont les publications sur la Savoie sont innombrables (5).

(1) Mgr BILLIET reconnaît trois séries de terrains formant le sous-sol de la vallée du Bourget : 1° des terrains coquilliers très fossilifères (les marnes et les calcaires secondaires; 2° la molasse tertiaire, grès et conglomérats; 3° les cailloux roulés; l'alluvion (1820-23).

(2) Le chanoine Rendu (1833) ne tire de ses recherches qu'une classification fantaisiste des terrains de cette région, où il range les molasses et les calcaires ammoncéens (jurassique) dans la même « formation », sans aucune description intéressante.

(3) Le chanoine CHAMOUSSET, au cours d'une réunion de la Société Géologique de France à Chambéry (1844) (où Mgr BILLIET esquissait la première description géologique de la Savoie), conduisit une excursion au Plateau des Déserts et y reconnut la présence du Nummulitique et son indépendance des autres terrains.

(4) Louis PILLET rapportait en 1845 le premier le nummulitique au tertiaire, en 1854, une note sur l'Erosion fluviale dans le Bassin d'Aix, dans le but de reconnaître à quelle époque pouvait remonter la dernière extension glaciaire. On savait déjà qu'Aix était en grande partie construite sur l'urgonien et PILLET y a retrouvé la trace des anciens glaciers.

(5) PILLET publia, en 1863, une carte géologique des environs d'Aix-les-Bains, correspondant à son mémoire de 1859, et une étude de l'Urgonien de la région de Chambéry (1866) dont il devait modifier les conclusions dans les années suivantes; une carte géologique complète de la Savoie, due à sa collaboration avec Charles LORY et l'abbé VOLLET, publiée en 1868, donne une idée suffisamment exacte de la géologie de ce département, dont les grands traits étaient maintenant déjà connus : PILLET étudiait en 1876 l'orographie et la géologie de la chaîne du Nivolle, et en recueillait sur le plateau des Déserts des fossiles qui furent examinés par Tournouer et permirent de dresser une coupe de cette région, comprenant à la base brèches calcaires à polypiers (urgonien), flus, puis calcaires nummulitiques, calcaire siliceux à potamidés, grès micacés à bivalves : ces différents épisodes lagunaires et marins du plateau des Déserts commençaient à être bien connus et les deux études géologiques de Louis PILLET, l'une consacrée aux terrains quaternaires dont il divisait les formations en préglaciaire, glaciaire et postglaciaire, cela pour chaque canton du département, et la seconde consacrée à la description d'un gisement fossilifère, à affinités aptienne, dans l'Urgonien d'Aix-les-Bains.

A la même époque, Charles LORY (1), l'abbé VALLET (2), NOGUÈS (3) débrouillaient par leurs multiples excursions les difficultés de la Montagne, et HOLLANDE en levait la carte géologique et publiait, sur les curiosités qu'il avait rencontrées, de nombreuses notes (1).

La thèse de Reuil, qu'avait précédé de nombreuses publications (2), résume en 1905 l'ensemble de nos connaissances sur les chaînes subalpines acquises pendant tout le XIX^e siècle. Nous empruntons à cet auteur la description stratigraphique qui va nous permettre d'apprécier la valeur hydrologique des différents terrains.

(1) Ch. LORY, *Notice sur la Société Géologique de la Savoie* (Mém. Ac. de Savoie, 2^e s., t. X, page 59).

(2) En 1863, l'abbé VALLET étudie la rive Est de la Doria, et y décrit la coupe que lui montrait la falaise : 1^o à la base, un poudingue à galets calcaires et grains siliceux; 2^o des calcaires jaunâtres à polypiers, carithes et notices; 3^o des grès jaunâtres se délitant en un sable fin; 4 des calcaires siliceux; cette description est juste, mais l'interprétation en fut inexacte.

(3) NOGUÈS donne (1876) une coupe du plateau des Déserts comparable à celle de PILLET.

(1) En 1879, HOLLANDE, qui devait faire tout le levé géologique des régions que nous étudions, publiait son premier travail sur la montagne du Nivolet, qu'il revoyait l'année suivante.

HOLLANDE suppose que l'anticlinal d'Aix-les-Bains ne serait que la continuation vers le Nord de l'anticlinal Corbelet-Hauteran-la Chambotte (1892) et assure que la nature des dépôts tertiaires de la vallée des Déserts serait très variable, publiant pour le prouver une série de coupes de la région des Déserts, où les niveaux géologiques trop nombreux et les passages latéraux insuffisamment indiqués (1895) ont été discutés par RÉVIL dans sa thèse.

(2) Toutes les publications concernant Aix-les-Bains sont citées à la Liste bibliographique et on en trouve d'ailleurs le résumé dans la thèse de RÉVIL (1908).

Brève esquisse stratigraphique de la région d'Aix

Les terrains représentés dans la région qui nous intéresse vont du Jurassique supérieur jusqu'à l'alluvion glaciaire. Le Jurassique supérieur n'est représenté que par la crête de l'extrémité méridionale du Revard; composé de calcaires de facies variable, appartenant surtout au Tithonique, le Jurassique supérieur, par sa position géographique, n'a qu'une faible importance par rapport à la production des eaux d'Aix-les-Bains; sillonné de fentes, de canaux souterrains et de grottes, ce terrain présente le régime hydrologique vauclusien que nous retrouverons bien mieux développé dans l'urgonien.

Le Valanginien inférieur ou Berriasien (C_{vi}) et le Valanginien proprement (C_v) ont un rôle important dans les chaînes du Revard et du Nivolet, où on peut suivre leurs affleurements fossilifères sur de longues distances; cet étage donne plusieurs bonnes coupes dans le Nivolet, notamment au hameau de Lovettaz, au col de la Doria et au château de Chattardon dans le Mont Pennay; on y voit des intercalations successives de bancs marneux et de bancs calcaires, qui expliquent le rôle de plancher imperméable et de ni-

veau d'eau qu'il remplit (1).

Dans le Revard, toute la partie moyenne du Valanginien est représentée par des calcaires blancs coralligènes, tandis qu'à la gare de Pré-Jappert, on voit successivement le Valanginien constitué, de bas en haut, par des calcaires à silex, puis des calcaires blancs, oolithiques par places et à cassure conchoïdale, surmontés par les marnes hauteriviennes : en somme, tandis que le Valanginien est formé d'alternances marneuses et calcaires dans le Nivolet, il est de plus en plus calcaire et compact dans le Revard : le niveau d'eau n'est plus, là, le Valanginien, mais l'étage immédiatement supérieur.

L'Hauterivien (C_{IV}), grand niveau marneux et imperméable du Nivolet et du Revard, se subdivise en deux sous-étages caractérisés : l'inférieur, par une

(1) Au voisinage de Chattardon, la coupe de cet étage nous montre successivement de bas en haut :

1° des bancs marneux à *Hoplites* (*Thurmamaia*) *Boissière* PICTET, exploités pour chaux hydraulique, passant latéralement par Saint-Jean d'Arvey, à des alternances de calcaires et des marnes;

2° des marno-calcaires un peu gréseux, en bancs minces;

3° une grande masse de calcaires jaunes très durs, épais de 60 mètres, passant latéralement (cascade de Lovettaz) à des calcaires alternant avec des bancs marneux très fossilifères, puis, à l'Est du château de Chattardon, à des marnes à brachiopodes et échinides;

4° des calcaires massifs à texture grenue, roux extérieurement et bleuâtres à la cassure, sans fossiles;

5° des calcaires roux à terebratules, contenant à Lovettaz *Alectryonia rectangularis* Rœm, sp. caractéristique de l'Hauterivien supérieur, qui, au-dessus du hameau de Nivollet, passent à des calcaires marneux jaunâtres.

abondance plus grande de marne et le fossile *Hoplites* (*Acanthodiscus*) *radiatus* BRUG sp.; le supérieur, par des marnes moins franches, plus calcaires à *Toxaster Retusus* LAM.

Le Mont Pennay, sur la rive gauche du torrent de la Doria, donne une coupe complète de l'Hauterivien avec, à sa base, des marnes grises passant par endroits à des calcaires gréseux à teinte rousse, au-dessus desquels on trouve des marnes calcaires, puis un lit de calcaires de 0 m. 30 à rognon de silex à *Toxaster Retusus*.

Dans le Nivolet, l'étage est représenté à sa base par des marnes schisteuses et bleuâtres, au sommet par une grande épaisseur de marno-calcaires peu fossilifères, où des bancs, plus marneux au sommet, renferment en grande quantité *Toxaster Retusus* et *Exogyra Coulonis* DEF sp. Ce facies se poursuit dans le Mont des Ramées et forme, tout le long du Revard, la région la plus voisine de l'abrupt qui est représenté par les calcaires du Valanginien; près des chalets du Revard, les marnes hauteriviennes très fossilifères se développent sur le sommet même de la montagne (1.500 m.); les bancs marneux, peu inclinés, forment une grande surface du plateau intérieur du Revard, où ils sont accidentés de bêttoires correspondant à des effondrements du calcaire valanginien sous-jacent; très humides, parce que très imperméables, ils donnent lieu à la production de ruisselets qui disparaissent

sent dès qu'ils prennent contact avec les calcaires fissurés de l'Urgonien.

L'importance et l'épaisseur de l'Hauterivien, son imperméabilité absolue, sa position juste au-dessous de l'Urgonien explique son importance hydrologique et qu'il est le grand niveau des résurgences des eaux infiltrées dans ces calcaires sus-jacents. (Voir chap. suivant.)

L'Urgonien (C" C'''), comme on le sait, n'est qu'un facies qui, dans ces diverses parties des Alpes, monte à des niveaux différents; mais dans la Savoie il surmonte les marnes hauteriviennes et correspond à peu près complètement au Barremien et à l'Aptien; ces calcaires zoogènes provenant de la solidification de débris divers (algues calcaires, vases à miliolles, poly-piers) forment de longues lignes d'escarpements d'aspect ruiniforme, profondément fissurés et crevas-sés de quantités de bétoures, avens, gouffres, où disparaissent les eaux météoriques, ou bien s'épandent en vastes surfaces caillouteuses au pied de leurs falaises; ailleurs, dans le synclinal des Déserts, ce sont les lapiez aux arêtes coupantes (1).

Son épaisseur est énorme dans la région qui nous occupe; le Mont Pennay et la Dent du Nivollet sont

(1) On peut y distinguer, assez mal d'ailleurs, deux sous-étages à la base un calcaire oolithique jaune, avec encore des lits marneux, au sommet, formation beaucoup plus importante, une grande masse de calcaires zoogères blancs, à section de Rudistes, offrant l'aspect caractéristique du facies urgonien.

composés, à la base, de calcaires jaunâtres et spathi-ques surmontés de calcaires massifs formant les crêtes.

L'Urgonien constitue également le Rocher du Roi à Aix-les-Bains, et les abrupts de la Chapelle Saint-Victor, au-dessus de Mouxy, où il correspond à la charnière anticlinale du Revard.

Le crétacé moyen et supérieur n'étant pas représenté, nous passons aux terrains tertiaires.

L'Eocène inférieur est représenté sous l'aspect du sidérolithique sur le plateau des Déserts par des sables grossiers à cailloux de quartz, des argiles rouges de décalcification et des brèches à silex, cimentées par une argile ferrugineuse et d'origine continentale (1), qui occupent des poches dans l'Urgonien (2) et ne jouent pas de rôle hydrologique.

L'Oligocène forme une partie de la Molasse du plateau des Déserts, où la succession de différences faunes

(1) Décrites par REVIL, « Bull. Soc. d'Histoire Naturelle de Savoie », 1^{re} série, tome I, page 13; elles avaient déjà été signalées par PILLET.

(2) Leur origine, d'après REVIL, ressort, pour les argiles rouges, de la décalcification de certaines roches par les eaux de ruissellement, et quant aux brèches des cailloux de quartz provenant du Gavet et des silex de la craie (qui actuellement enlevée par l'érosion couvrait autrefois toute la région); REVIL basait cette déduction sur la découverte dans les brèches de morceaux de craie ayant échappé à la destruction.

Ce genre de dépôts se retrouve en deux points du plateau des Déserts, à la Féclaz et au Praz-Long, et en certains points de la forêt de la Magne, représentées par de minces lambeaux d'argile rouge plaquée contre des poches de l'Urgonien.

a permis de dater plusieurs étages successifs, et a suscité l'émulation de nombreux chercheurs (3).

L'Aquitanien à *Helix Ramondi* est représenté par le grand ensemble des molasses oligocènes, correspondant à des formations lagunaires, sur le bord desquels se formaient des lignites : on en retrouve la trace à Sonnaz, entre Aix et Chambéry, et en divers autres points de la Savoie.

La Molasse aquitanienne succède insensiblement au grès du plateau des Déserts, elle consiste en grès verdâtres très délitables alternant avec des marnes rouges ou vertes, imperméables, et elle s'enfonce à l'Est sous l'anticlinal du Margeriaz (Cf plus loin).

A l'ouest du Mont Revard, la molasse forme un synclinal étroit et recouvert à peu près partout par l'alluvion glaciaire : c'est, entre Aix et le Revard, le petit synclinal de Pugny et Mouxy qu'une ride anticlinale — la Roche du Roi — sépare du synclinal occidental, celui des rives du lac du Bourget.

Le Miocène n'est pas représenté à Aix-les-Bains :

(3) Actuellement, reposant sur l'Urgonien toujours fissuré, on trouve d'abord :

1° un poudingue calcaire à gastropodes et polypiers;

2° un calcaire gréseux à nummulites et pecten, ces deux formations représentant le Saumainien, et quoique peu épaisses, sont relativement imperméables;

3° des schistes marneux à écailles de poissons, dont certains bancs des couches supérieures passent à des calcaires compacts fossilifères : c'est un facies flysch parfaitement imperméable, que surmontent;

4° les « Grès des Déserts », grès micacés à bivalves.

car cette époque est marquée par une importante transgression marine, dont le rivage s'est précisément arrêté à la chaîne Semnoz-Revard-Nivolet, et dont les premiers dépôts, produits de la désintégration de ce rivage, se trouvent un peu au Nord, à Grésy-sur-Aix, sous forme de fines marnes blanches.

Enfin, les dépôts quaternaires sont représentés dans toute la région d'Aix-les-Bains par des dépôts alluviaux d'épaisseur très variable, mais qui ne forment en réalité qu'une pellicule peu puissante. Leur rôle hydrologique est suffisamment important pour qu'ils méritent une description assez détaillée, nous les voyons en effet former ce sol de toute la campagne d'Aix-les-Bains et surplomber l'établissement thermal, dont les eaux jaillissent au jour, précisément au contact de l'Urgonien et de ce Quaternaire, dont l'origine est essentiellement glaciaire (1).

(1) Au début du Pleistocène, les massifs savoisiens furent recouverts d'immenses accumulations de neiges et de glaces, qui, au cours de leurs retours successifs, abandonnèrent l'altitude élevée des sommets où elles formaient un plateau, et s'encaissèrent peu à peu lors du retour successif des glaciations dans des vallées qui s'approfondissaient toujours par ces creusements réitérés (KILIAN, « Les glaciers du Dauphiné »).

Ces dépôts extrêmement variables, sont essentiellement des cailloutis et des galets dont la taille peut aller jusqu'à former d'énormes blocs erratiques pesant plusieurs centaines de tonnes, et la classique « argile à blocs », qui s'échelonnent à des altitudes de plus en plus basses, correspondant aux divers stades de creusement de la vallée.

La plus ancienne glaciation, celle de la période Russienne, n'a pas laissé de traces dans la chaîne du Revard-Nivolet; ses dépôts descendent jusqu'à l'altitude de 1.200 mètres.

La glaciation Würmienne, qui lui succéda, étage ses cailloux roulés et polis entre 500 et 600 mètres; c'est la haute terrasse

Enfin ces alluvions glaciaires ont été remaniés postérieurement par des actions torrentielles qui ont créé des cônes de déjection et des sols peu stables, recouverts de terrains meubles et humides, susceptibles de s'imbiber d'eau et de glisser en coulées de boue — phénomènes dangereux mais fréquent en terrains de montagnes; il en existe d'importants éboulis au etc... (1).

III. — *Les abords immédiats d'Aix-les-Bains*

Tous les terrains que cette courte revue stratigraphique vient d'énumérer ne sont pas représentés aux abords immédiats d'Aix; la succession des couches qui prennent part à la constitution des rides anticlinales que nous avons décrit au début de ce chapitre a été bien étudiée par REVIL, grâce à la coupe que lui fournissait la tranchée du funiculaire du Revard, qui lui permet d'établir l'allure de la tectonique des terrains immédiats d'Aix (2).

de la vallée de Chambéry, qu'on trouve par lambeaux au Sud du Nivollet et du Mont Rennay.

La basse terrasse représente la surface de progression de la troisième glaciation ou Mendélienne; c'est à cette période que se sont déposées les alluvions glaciaires — galets roulés ou striés, lignites et argiles à blocs — de la région basse et plate qui forme le passage de l'Isère au Rhône : la Cluse de Chambéry.

(1) Tout le territoire ébouleux est parsemé de roches appartenant aux divers niveaux du crétacé supérieur, et où les gros blocs urgoniens se sont étendus plus loin en formant de petites buttes attardées, donnant à ces régions l'aspect chaotique des drumlins.

(2) « Les Sources Thermominérales de la Savoie », publication dans la *Revue Générale des Sciences*, 30 octobre 1908.

En remontant d'Aix vers le Revard, et en suivant le funiculaire, on trouve d'abord les calcaires compacts urgoniens, horizontaux appartenant à la charnière du brachyanticlinal; on les voit bien dans la tranchée du funiculaire et ils présentent les mêmes caractères dans une carrière située au sud de la voie, au lieudit « N.-D. des Neiges ».

Puis ces bancs horizontaux prennent un pendage Est, et, au niveau du « Quartier des Moulins », ils paraissent s'enfoncer sous la couverture glaciaire, très importante aux abords de Mouxy.

Au-dessus de ce village apparaît la molasse aquitaine composée de grès marneux verdâtres alternant avec des calcaires blanc-grisâtre et des lits marneux bariolés; un Gastropode, *Helix Ramondi* BRGT date ces assises lacustres auxquelles succèdent des couches marneuses, burdigaliennes, pendant vers l'Est de 15°, formés de grès sableux, verdâtres, stratifiés en bancs assez épais et qui forment tout le soubassement de la station climatérique des Corbières; ils affleurent encore près de la station de Pugny-Chatenôd.

Plus haut, la tranchée ne montre, jusqu'à Pré-Jappert, qu'une couche continue d'éboulis où apparaissent par places des pointements de Vindobonien représentés par un grès tendre et sableux, de teinte claire, formant le noyau de la cuvette de Mouxy; en effet, si les éboulis cachent en partie le sol et rendent impraticable l'observation dans la tranchée, un peu plus loin, au sud-est de

la colline des Corbières, on retrouve les grès durs du Burdigalien et les assises bariolées de l'Aquitaniens ; des accidents de détail ont même renversé par places les petits lits verticaux de cette formation.

Au-dessus du Pré-Jappert, la voie passe en tunnel dans le crétacé, représenté par des calcaires marneux bleuâtres et des calcaires jaunis (Rhodanien), des calcaires gris compact et blancs teintés de roux (Urgonien), et des calcaires oolithiques à gros grains et petits brachiopodes (Barrémien inférieur). Tous ces bancs calcaires sont renversés et montrent un plongement Est qui les fait paraître s'enfoncer sous la montagne. Puis on rencontre, en continuant à s'avancer dans le tunnel, des calcaires en petits lits de teinte jaune ou bleue, puis des bancs marneux schisteux par places (Hauteriviens), des calcaires à silex (Valanginien supérieur) et des calcaires compacts, très épais, un peu crayeux et oolithiques par places, d'allure coralligène, qui représentent le Valanginien inférieur et correspondent à la charnière anticlinale; très épais, on les retrouve pendant toute la traversée du tunnel et ils se rencontrent encore à l'extrémité du funiculaire, où ils se montrent surmontés des calcaires à silex du Valanginien supérieur, puis des calcaires marneux hauteriviens que leur faible pendage va faire constituer toute la surface humide et imperméable, peu inclinée du plateau du Revard.

Voici donc la coupe que donne la tranchée du funiculaire; qu'on s'en éloigne vers le Sud, on trouve une masse de rochers détritiques et ébouleux avoisinant la chapelle Saint-Victor, où l'érosion a profondément entamé tout le flanc occidental du Revard, dont les calcaires crevassés se présentent en bancs verticaux, plongeant fortement vers l'Ouest et formant la falaise abrupte d'où tombe la Cascade du Ru, tandis que le flanc oriental présente un plongement beaucoup plus faible — 25° — vers l'Est.

D'action encore plus considérable à mesure qu'on va vers le Sud, l'érosion a décapé jusqu'au Jurassique dans la région de Mentens, où les dislocations, plus intenses, ont mis en contact l'Urgonien du flanc occidental à pendage Ouest subvertical avec le Jurassique supérieur plongeant à l'Est; l'Urgonien disparaît bientôt, abrasé, et c'est l'Hauterivien à *Toxaster Retusus* LAMCK, puis le Valanginien qui se relèvent contre le Tithonique; celui-ci est composé de couches rognoneuses reposant sur les calcaires néocomiens étirés, plongeant en sens inverse, dont il est séparé, non par une faille, mais par un pli-faille.

IV. — *Les études récentes*

KILIAN, étudiant à la demande de l'Institut d'Hydrologie l'origine des eaux thermales et le rôle des accidents tectoniques, émettait en 1923 une opinion différente sur les rapports des deux affleurements

d'Urgonien, celui du Mont Revard et celui de la Roche du Roi; faisant d'abord une description de l'état karstique de la Roche du Roi, de ses fissures et de ses crevasses, en rapport avec la dissolution du calcaire par les eaux souterraines (les unes recimentées de calcite, les autres au contraire élargies par l'action chimique des eaux et devenues de véritables boyaux aquifères), KILIAN suivait l'affleurement crétacé accidenté de nombreuses failles de tassement sous la pellicule de cailloux glaciaires dont l'épaisseur très réduite augmente rapidement depuis l'Etablissement vers Mouxy, et qui forme le bombement anticlinal de la Roche du Roi; KILIAN insistait sur l'impossibilité de rattacher ce bombement anticlinal très net, (d'abord échancré par l'érosion sous la ville d'Aix, puis revêtu en direction du lac de Bourget d'une couverture mollassique imperméable) aux escarpements calcaires de même facies et qui forment sur le flanc Ouest du Revard, au rocher Saint-Victor, une barre s'enfonçant verticalement sous la molasse tertiaire, recouverte plus ou moins complètement d'éboulis actuels et d'alluvions glaciaires; cet affleurement oligocène d'allure synclinale sépare totalement les deux affleurements urgoniens ainsi décrits.

Les dernières études des prolongements Sud et Nord de la chaîne du Revard-Nivollet, des coupes fournies par les vallées transversales qui l'entament (la Doria, le Pont de l'Abîme, le Semnoz), montrent qu'il s'agit

de la chaîne du Revard-Nivolet, les coupes fournies vauchant par un contact anormal : les assises molassiques et urgoniennes de la région d'Aix qui s'enfoncent sous cette chaîne vers l'Ouest.

Cette surface de chevauchement inclinée vers l'Est sépare la Roche du Roi du calcaire redressé et même renversé par places du rocher Saint-Victor; actuellement, on ne peut admettre ni une faille verticale avec JACQUOT et WILM ni non plus, avec REVIL, un simple repliement synclinal peu profond du crétacé, qui serait symétrique par rapport au bassin molassique; au contraire, l'étude du pendage des assises de molasse, dirigées vers l'Est, à l'est de Mouxy, indique plutôt l'existence de la surface de chevauchement ci-dessus décrite.

En 1927, M. GIGNOUX, successeur de KILIAN à la chaire de Grenoble, accepte d'étudier, à la demande de l'Institut d'Hydrologie, la tectonique du haut plateau Revard-Les Déserts, que KILIAN avait indiqué comme pouvant être l'origine de production des eaux thermales d'Aix-les-Bains et qui allait faire l'objet d'une expérience de circulation à la fluoresceine (voir les chapitres suivants); ces plateaux, constitués par le flanc Ouest, à pendage faible du synclinal des Déserts, que chevauche à l'Est l'anticlinal du Margeriaz, montrent un double plongement des couches, d'abord vers l'Est et plus faible encore vers le Sud (1).

(1) En effet, tandis que les hautes crêtes du Revard (1.550 m.) sont formées au Nord par le Valenginien, ce même terrain n'apparaît que dans le fond des vallées (600 m.), vers le Sud.

Au sud des plateaux du Désert, le Mont Peunay porte la trace du passage d'une surface de chevauchement, où « la paroi urgonienne est en quelque sorte redoublée », et où on peut discerner un chevauchement des calcaires urgoniens venant de l'Est dessinant « une charnière anticlinale courbée et étirée » au-dessus des mêmes calcaires urgoniens venant se « terminer en éperon à la base de la falaise et buter contre l'Hauterivien marno-calcaire ». C'est ce que M. GIGNOUX, à qui nous empruntons cette description, a appelé le pli faille du Mont Pennay, dont on retrouve le prolongement plus au Nord (région des granges de la Palen); cet accident fut noté par MM. DOUXAMI et REVIL sur la carte géologique; celle-ci montre en effet que deux petits synclinaux secondaires viennent diviser le grand synclinal molassique des Déserts; donc, c'est : 1° le synclinal de la Palen qui aboutit au col de la Doria, où il provoque un abaissement d'axe de la falaise urgonienne qui rend compte de l'abondance toute particulière de la résurgence.

2° le synclinal du Praz long dont la terminaison sud-est vient au hameau de Pennay.

Ces deux synclinaux sont séparés par une étroite ride anticlinale où affleure l'Urgonien, et dont le flanc Ouest paraît chevaucher ce synclinal de détail de la Palen, ce qu'ont figuré DOUXAMI et REVIL (Cf la coupe)

sur une coupe de détail. D'après GIGNOUX, il n'est pas douteux que ce chevauchement de détail prolonge celui qu'on voit dans le flanc Sud du Mont Pennay, faisant sur toute sa longueur un barrage vers l'Est de toutes les eaux recueillies par le petit synclinal de la Palen.

Enfin, il existe, plus au Nord encore, un prolongement évident de cet anticlinal, c'est le pointement isolé de la Ville, et l'étude de la région qui lui fait suite vers Vayneuble permettra sans doute de l'y retrouver.

Dans cette étude, M. GIGNOUX attirait l'attention de l'Institut d'Hydrologie sur la bande d'Urgonien redressée au-dessous de la chapelle Saint-Victor, et que KILIAN considérait comme le flanc occidental, laminé et traversé de l'anticlinal du Revard. ROCH, chargé d'examiner cet affleurement, a reconnu, dans une note, trois affleurements d'Urgonien distincts :

1° au Nord, un rocher ébouleux et mal isolé, à pendage peu net, situé juste à l'est de la source des Deux-Reines; un ressaut, de la pente de la montagne, permet de le suivre sous un manteau d'éboulis qui empêchent de voir la roche en place;

2° au-dessous de la chapelle Saint-Victor, l'Urgonien forme une haute barre rocheuse que franchissent les deux cascades du Ru et de l'Angolet, et dont le pendage est vertical; cet affleurement est au contact supérieur avec des marnes bleuâtres sans fossiles qui semblent de l'Hauterivien;

3° au Sud, entre les hameaux de Mentens et du Dendier, l'Urgonien forme une longue bande étroite de rochers verticaux fissurée, de pendage peu visible.

Enfin, à part ces trois affleurements, ROCH n'a retrouvé nulle part cet Urgonien. Sur sa position exacte dans l'anticlinal du Revard, il est assez difficile de se prononcer.

CHAPITRE VII

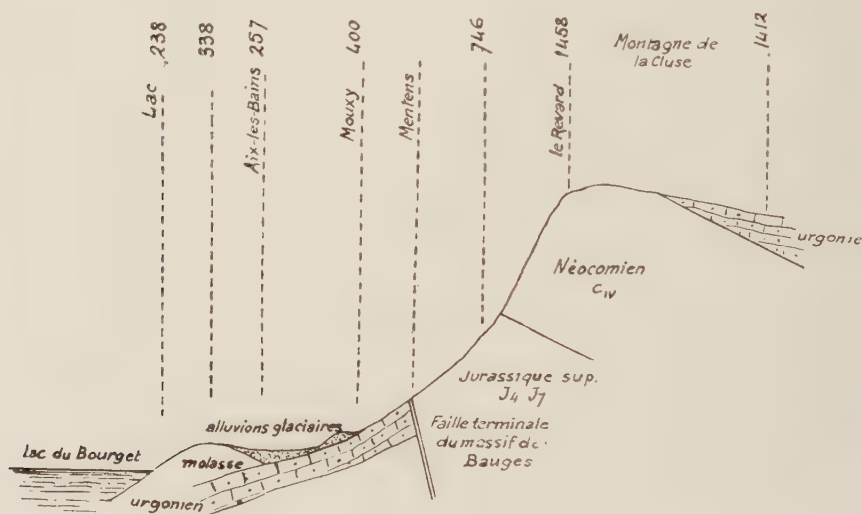
L'ORIGINE THÉORIQUE DES EAUX D'AIX

L'observation sur le terrain montre que les eaux thermales sourdent du calcaire urgonien; aussi toutes les théories qui ont expliqué leur origine ont cherché d'où l'Urgonien avait bien pu recevoir ces eaux et par quels procédés elles revenaient au jour.

Les anciens auteurs LORY, WILM avaient placé à l'ouest du massif des Bauges une grande faille terminale, plus ou moins verticale, hypothèse qui était basée sur la constatation, dans la région de Meutens, du recouvrement de l'Urgonien par la charnière anticlinale jurassique du Revard. Cette faille expliquerait la remontée rapide de toutes les eaux reçues par le Revard et son flanc supérieur.

REVIL (1905) a constaté que cette faille n'existait pas; le massif occidental des Bauges est limité sur son revers occidental par un pli-faille, c'est-à-dire un plan de chevauchement superficiel amenant les assises jurassiques à chevaucher les calcaires urgoniens

par suite de la poussée alpine tangentielle dirigée de l'Est vers l'Ouest. Quant aux failles constatées dans le brachyantoclinal de la Roche du Roi, ce ne sont que des fractures de détail, des failles transversales dues au tassement et n'intéressant qu'une faible épaisseur des assises jurassiennes — et probablement même le seul Urgonien.



A Aix, les calcaires urgoniens horizontaux forment le sommet en plateau du brachyantoclinal; ils s'enfoncent à l'Est sous la cuvette tertiaire de Mouxy, et à l'Ouest sous le synclinal mollassique des rives du lac; pour REVIL, les eaux ont pénétré dans les bancs calcaires fissurés et redressés verticalement de l'anticlinal du Revard; retenues en bas par les couches

marneuses de l'Hauterivien, elles suivent toutes les inflexions de ce niveau hydrostatiques, passent sous la cuvette de Mouxy et émergent grâce aux failles de tassement de la Roche du Roi. Dans toute cette hypothèse, on ne fait nulle part intervenir la remontée par faille, et l'échauffement des eaux est rapporté à la descente des eaux en profondeur (1), à la pression exercée derrière elles par les eaux froides descendantes et s'échauffant à mesure, et à la lenteur de cette circulation de descente par des fentes capillaires.

REVIL voit dans la composition chimique des eaux d'Aix un rapport avec la nature des terrains traversés et réfute l'hypothèse des venues d'eaux profondes par le fait de la non-existence de la faille (2).

GODDARD (1901), ayant réuni cinquante années d'observations météorologiques sur la région d'Aix-les-Bains, situe l'origine des eaux dans le haut plateau situé à une altitude moyenne de 1.400 mètres, entre le Revard à l'Ouest et la Magne à l'Est, où l'Urgonien est partout représenté; cette hypothèse va être reprise et discutée par la mission de l'Institut d'Hydrologie (voir plus loin et chapitres suivants).

(1) La différence d'altitude entre la partie haute du versant occidental du Revard et le fond de la cuvette de Mauxy (1.000 à 1.100 mètres) est plus que suffisante pour expliquer cette thermalité.

(2) L'Urgonien et les marno-calcaires hauteriviens sont riches en bisulfite de fer, tandis que ces eaux contiennent H_2S , du soufre libre, So^4Ca , So^4Mg , et So^4Na^2 . REVIL en déduit que le bisulfure est sulfaté par l'eau et l'air dissous, l'hydrogène sulfuré, les hyposulfites et le soufre libre provenant de leur réduction par les matières organiques.

Michel LÉVY (1902) rapportait l'origine des eaux thermales à une distance bien plus grande : une faille Nord-Sud, bordant à l'Ouest le massif de la Dent du Chat sur plus de 20 kilomètres draînerait vers l'Est toutes les eaux reçues par ce massif, qui, emmagasinées par l'Urgonien, chemineraient sous le lac du Bourget avant d'apparaître à Aix-les-Bains.

GORCEIX, se ralliant à cette hypothèse, voit l'alimentation de cette faille principale à l'aide de pertes subies par le Rhône, vers Cressin (où un bras du fleuve franchit des assises jurassiques faillées et redressées verticalement) pouvant amener toutes ces eaux sous le Mont du Chat et le lac jusqu'à Aix.

Enfin, un calcul des recettes atmosphériques et fluviales du lac de Bourget, comparé à son débit, permet de voir que l'évaporation ne suffit pas à expliquer la différence entre l'eau gagnée et l'eau échappée par le canal de Savière, et que des infiltrations de son lit peuvent contribuer à la formation des eaux thermales.

En 1923, KILIAN, auquel l'Institut d'Hydrologie avait demandé un avis sur l'origine possible des eaux d'Aix-les-Bains, réfutait la possibilité de leur remontée par une faille verticale ainsi que l'avaient soutenue JACQUOT et WILM (voir chapitre précédent), et se rangeait plutôt à l'hypothèse d'une surface de contact anormale s'enfonçant vers l'Est, sous l'anticlinal déversé du Mont Revard, qui constitue par discontinuité

une zone de circulation faible pouvant provoquer la remontée rapide des eaux chaudes moins denses que les eaux froides; la minéralisation spéciale des eaux doit être due à leur circulation, le long du plan de dislocation, au contact des gypses et anhydrides triasiques: ce seraient des eaux sulfatées transformées en eaux sulfureuses par des actions réductrices diverses, au premier rang desquelles il faut placer les barégines, algues microscopiques connues de toujours à Aix; elles auraient acquis leur thermalité par le simple fait de leur descente à de grandes profondeurs sous l'épaisse couverture rocheuse que forme la chaîne Revard-Nivollet et leur présence dans l'Urgonien fissuré serait due à ce qu'au cours de leur descente en profondeur le long de la surface de discontinuité, elles auraient rencontré cet Urgonien compris entre deux assises imperméables, à la base des calcaires marneux de l'Hauterivien supérieur, au-dessus des molasses oligocènes pratiquement imperméables. Les eaux auraient alors abandonné le plan de discontinuité tectonique, qui resterait le lieu de cheminement des eaux météoriques froides se réchauffant à mesure de leur descente, elles se seraient emmagasinées dans les vides de l'Urgonien, et y seraient le siège d'une circulation souterraine; leur émergence à la Roche du Roi serait due à une sorte de siphonage, les eaux froides descendues poussant continuellement par derrière les eaux thermalisées, et, à leur tour, réchauffées et minérali-

sées, s'identifiant à elles.

Si l'on admet l'hypothèse d'une telle formation, les eaux thermales jaillissant aux griffons peuvent avoir pour origine, soit des infiltrations lointaines ou proches ayant pénétré dans la profondeur par le plan de charriage, soit la réception météorique de tout le massif fissuré et disloqué du Revard et du plateau des Déserts, qu'accidentent de nombreux gouffres et abîmes. Les infiltrations très lentes à travers les multiples diaclases tectoniques de ce massif auraient provoqué à la fois la descente des eaux à une profondeur de plus de 1.000 mètres, leur thermalisation graduelle et leur filtration parfaite, telle que ces gouffres ne peuvent être pour la source thermique d'aucune menace de pollution (d'autant qu'il leur restera à parcourir un trajet de 6 à 10 kilomètres au minimum, très long à travers des fentes étroites, parfois même capillarisées, dans des terrains de perméabilité très diverse).

Cette séduisante hypothèse a attiré l'attention toute particulière de l'Institut d'Hydrologie, qui, dans le but de la vérifier, s'est livré à une expérimentation à la fluorescéine que nous rapportons au chapitre suivant.

Enfin, KILIAN expliquait les altérations des eaux thermales par leur mélange avec des eaux froides au

voisinage de leur émergence, qui ne pourrait s'effectuer que sur un périmètre très restreint : il résulterait de l'envahissement des fissures urgoniennes par les eaux de surface ayant saturé les dépôts glaciaires sus-jacents, et cela au cours de certaines époques limitées (pluies exceptionnelles, fonte des neiges). Les dépôts glaciaires, qui sont en partie imperméables par l'intercalation de lits argileux et qui s'épaississent près de Mouxy, vers le Nord, ne permettent d'infiltration que là où leur épaisseur est insuffisante et ne montre pas d'argile glaciaire, d'où la conclusion que des travaux peu étendus suffiraient à leur protection : c'est ce que nous reverrons dans les chapitres suivants (1).

En 1927, au moment de l'expérience à la fluorescéine, M. GIGNOUX, étudiant le synclinal des Déserts, supposait que la circulation des eaux souterraines devait se faire, eu égard au double pendage de ce synclinal, vers le Sud-Est, et décrivait un accident tectonique local intéressant particulièrement la cir-

(1) Dans sa conclusion, KILIAN s'étant livré à l'étude comparative d'un certain nombre de sources alpines, insistait sur la difficulté de la distinction entre les eaux vadeuses, provenant de la surface, thermalisées, minéralisées et ramenées au jour, et les eaux juvéniles provenant de la profondeur; cette distinction est due à SUESS, mais il est à peu près impossible de faire le départ des unes et des autres, chacune ayant pu contribuer à la formation de la fissure thermique. En tout cas, la venue thermique d'Aix s'explique très bien sans la moindre intervention des eaux juvéniles.

culation de ces eaux, le pli-faille du Mont Pennay, provoquant la formation d'une sorte de cul-de-sac sans écoulement, où sont arrêtées les eaux reçues et infiltrées sur tout le plateau des Déserts et collectée dans l'Urgonien qui vient butter contre les masses hauteriviennes imperméables : c'est là que sourd la résurgence abondante de la Doria, précisément au point le plus bas de la falaise, ce qui explique son volume.

M. GIGNOUX suivit vers le Nord le pli-faille du Mont Pennay, et démontra que l'alignement d'un anticlinal de détail, le petit anticlinal du Crêt, se prolongeant jusque vers la Ville et Vayneuble, séparait en deux bassins distincts toutes les eaux reçues par le plateau du Revard et collectées dans l'Urgonien : toutes celles reçues à l'Ouest se canalisent vers la Doria (900 m.), tandis qu'à l'Est de ce même barrage, les eaux vont ressortir à Fontaine-Froide (680 m.), en face le hameau de Fougères.

Les opinions très intéressantes de M. GIGNOUX sur la circulation du Grand-Revard furent d'ailleurs confirmées par les expériences à la fluorescéine, rapportées au chapitre suivant.

CHAPITRE VIII

L'ÉTUDE DE LA CIRCULATION SOUTERRAINE

DES EAUX THERMALES

PAR L'INSTITUT D'HYDROLOGIE

(Voir les planches à la fin du volume.)

Le chapitre précédent nous a montré comment les différentes théories émises quant à l'origine des Eaux d'Aix ont localisé les recherches autour du Revard, dans la région située à l'Est de notre station thermale; c'est vers cette région que s'est portée l'attention de l'Institut d'Hydrologie; persuadé de l'intérêt qu'il y aurait à mettre en évidence, par une expérience démonstrative, la descente en profondeur des eaux absorbées sur le Revard et leur réapparition, minéralisées et thermalisées, aux griffons d'Aix-les-Bains, l'Institut d'Hydrologie mit à la disposition des services compétents les fonds importants nécessaires à cette tentative, et de nombreuses prospections furent entreprises sur le haut territoire du Revard.

Nous aurons pour but ici de résumer quelles furent ces études et le résultat qu'elles donnèrent, et, après une description géographique et hydrologique du haut-plateau sus-nommé, nous résumerons les expériences qui ont mis en évidence les quatre séries de circulations souterraines :

- 1° Les circulations urgoniennes;
- 2° Les circulations valanginiennes;
- 3° Les circulations molassiques;
- 4° Les circulations glaciaires.

I. — LE CHAMP DES EXPÉRIENCES

A. — *Le haut-plateau du Revard.*

C'est une haute dépression, comprise entre deux chaînes à peine plus élevées : tandis que l'altitude du plateau se tient aux alentours de 1.350 mètres, celle du Revard est en moyenne de 1.500 et celle de la chaîne de la Magne, à l'Est, n'est que de 1.450 m.; la constitution géologique en a été étudiée précédemment; nous n'y reviendrons pas et énumérerons seulement les traits caractéristiques de l'hydrographie de cette surface si nue et si peu habitée que l'une des communes — dont il forme une bonne part du territoire — s'appelle « Les Déserts ».

Recouvert d'une maigre végétation de buissons, c'est un plateau aride où affleure presque partout la roche en amoncellements de gros blocs, en petites collines rocheuses et dénudées se dressant au-dessus de la plaine, en larges surfaces complètement stériles couvertes de pierrailles. Les pluies y sont fréquentes au printemps et à l'automne, l'enneigement est épais et durable, tel que les hôtels du Mont-Revard y ont pu créer une piste de sports d'hiver; mais que devient cette eau sur les calcaires fissurés de l'Urgonien et les calcaires marneux plus imperméables de l'Hauterivien, qui forment la plus belle part de cette surface d'absorption? Le ruissellement est à peu près nul, et les eaux de surface disparaissent presque aussitôt, soit dans les innombrables fissures du calcaire, soit dans des cavités de dimensions plus importantes, dont un dangereux fouillis de végétation cache souvent l'orifice au jour; ailleurs, de courts ruissellements aboutissent à une petite prairie maigre, colmatée par l'argile de décalcification : c'est la doline typique des paysages karstiques, entretenue par l'accumulation d'une petite nappe d'eau qui s'y absorbe en une demi-journée. Enfin, il n'y a pour drainer les pentes indécises de cette surface de 20 kilomètres carrés que de maigres ruisselets, aux cours inconstants, dont certains ont été figurés comme permanents sur la carte au

1/80.000 de l'édition de 1895, mais qu'on ne retrouve guère aujourd'hui.

B. — *Les points d'absorption des eaux météoriques*

Les terrains calcaires sont souvent l'objet d'une forme particulière de l'érosion, remarquablement bien développée dans le Karst, et caractérisée par ce qu'on appelle les phénomènes karstiques, qui sont nombreux, très compliqués, et ont été l'objet d'un grand nombre de recherches, au premier rang desquelles il faut placer celles du grand spécialiste des Causses, le savant professeur MARTEL.

Le trait caractéristique de ces phénomènes réside en la disparition du réseau hydrographique superficiel : il n'y a plus de rivières, plus qu'un ruissellement sans importance, et l'eau sitôt tombée est absorbée, avalée par des sortes d'entonnoirs dont le nom varie suivant les régions et qui ne correspondent pas d'ailleurs exactement les uns aux autres : gouffres, puits, avaloirs, bétoires, emposieux, etc.

Nous trouvons de tels accidents sur le plateau du Revard, et leur présence explique la disparition rapide des eaux pluviales et l'absence complet de drainage de surface; ce sont :

1° dans les calcaires marneux hauteriviens, de nombreux effondrements de taille variable, au-dessous des hôtels du Revard, qui sont provoqués par

des affleurements souterrains de calcaire massif valanginien;

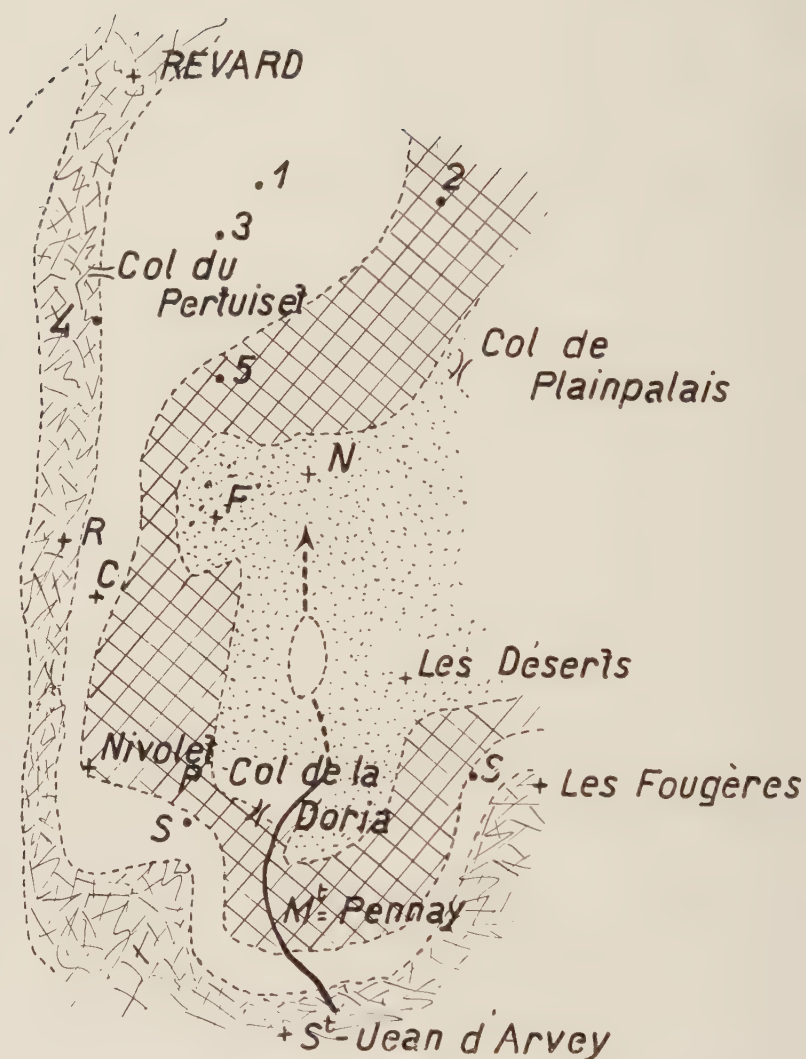
2° dans les calcaires compacts de l'Urgonien, sur la route du Revard aux Déserts, on note le creux de Rethiède, profonde excavation qui absorbe la totalité du ruissellement au moment de la fonte des neiges; un peu plus loin, plusieurs petits entonnoirs engouffrent les eaux qui proviennent d'une surface imperméable, les hauts marais de la Croix. Enfin, on connaît, entre le Creux de Rethiède et le hameau du Saffrey, un autre petit béttoire urgonien.

3° D'autres gouffres s'ouvrent dans des terrains sont ceux du Creux de Lolette, importante excavation circulaire d'un diamètre de 100 mètres, profond de 40, au fond duquel apparaît une mardelle-source sans écoulement. A quelque distance, un autre point d'eau : le Creux de Larcoutiers. L'emplacement de ces gouffres, comme ceux des hôtels du Revard, ne leur permettent pas de recevoir une importante alimentation.

En plus des caractères lithologiques, la disposition des couches est peu favorable, en raison de leur pendage vers l'Est, à la formation de sources; on ne note que quelques suintements sans importance tels que les sources du Nant du Ruz et de la Villa des Sapins.

Enfin, les sources du Feclaz sont une série d'émergences à la cote 1380 qui drainent de hauts marais

Marnes du valanginien inférieur



Tertiaire



Urgonien



Hauterivien



Valanginien

1 CREUX DE LA COLETTE

2 SOURCE DU NANT

3 CREUX DE LARCOUTIER

4 MARAIS DE LA CROIX

5 CREUX I F BETHIÈDE

C Vallée de PRAGONDRAN

F SOURCE DE LA FÉCLAZ

N LE SAPEY

R GRAND REVARD

S FONTAINE FROIDE

S LA DORIA

dénivelés d'une centaine de mètres au-dessous des crêtes du Revard; les eaux se perdent rapidement dans un ruisseau; elles réapparaissent à la résurgence de la Doria, elles ont fait l'objet d'une étude de l'Institut d'Hydrologie, et leur débit en saison sèche ne dépasse pas 2 litres/seconde; la résistivité en est de 4.580 ω .

Les vallées de distribution

Que deviennent donc toutes les eaux qu'ont absorbé cette surface sans écoulement? L'exploration méthodique de tout ce périmètre, les renseignements donnés par les gardes forestiers, aussi, pour une moindre valeur, les « dit-on » des habitants, ont permis de relever soigneusement tous les exutoires possibles des plateaux du Revard et des Déserts, dont les eaux ne se retrouvent qu'en minimales résurgences, de débit extrêmement faible, quoique non négligeables, et qui sont :

1° au Nord-Est, le *ruisseau de Saint-François*, mince affluent du Chéran, dont le cours moyen est à 7 km. du centre du plateau, et surtout alimenté par le versant occidental de la chaîne de la Margeriaz; les Monts de la Magne ne lui donnent qu'une faible part de ses eaux, qui sourdent d'une multitude de

petites sources, dont les principales, situées à l'amont du Col de Plainpalais, sont la source du Nant et de Laduy.

2° au Sud-Est, dans la même orientation que le ruisseau Saint-François, *le haut-cours de la Leysse*, alimentée surtout à partir de Saint-Jean d'Arvey par ses affluents méridionaux, ne reçoit à droite qu'un petit nombre d'affluents provenant des sources de :

Fontaine Noire (au-dessous des Déserts), qui sert à l'alimentation de la commune de Saint-Jean d'Arvey : son débit variable, assez abondant pour être utilisé comme force motrice, provient d'une fissure qui traverse à la fois l'Urgonien et les calcaires jaunâtre de l'Hauterivien supérieur, dont les marnes sous-jacentes du niveau inférieur forment le niveau imperméable. Les travaux de captage de cette source, observés par M. REVIL, montre qu'elle circule souterrainement dans un canal qui correspond en surface à une ligne d'entonnoirs d'effondrement et de dolines;

du Bout du Monde Saint-Jean d'Arvey;

la *Doria*, en amont du hamont de Lovettaz, au-dessous du col de la Doria, entre le Nivollet et le Mont Pennay, et qui est une grosse résurgence, supposée drainer les pertes de la Féclaz, qui jaillit

à 130 mètres au-dessous de la crête abrupte de la falaise, près de la cote 1000, par deux exutoires dénivelés d'une dizaine de mètres, témoignant, ainsi qu'un certain nombre de grottes plus élevées, de l'enfoncement du réseau souterrain. De l'exutoire inférieur, seul permanent, et débitant 100 lit.-seconde en période de pluies prolongées, sort une cascade qui forme un torrent allant rejoindre la Leysse.

Cet ensemble de sources donnant une quantité d'eau assez considérable peut être considéré comme l'exutoire partiel du plateau du Revard.

Par contre, un peu plus à l'Ouest, la verte vallée de *Pragondran* est habituellement sèche.

3° au Sud-Ouest, le *Tillet*, qui va se jeter dans le lac du Bourget, au delà d'Aix-les-Bains, reçoit ses eaux de la source du *Moulin de la Croix-Rouge* (faible émergence alimentant un moulin qui fonctionne par retenues et éclusées) ;

des sources des *Jacquiers*, émergences un peu plus importantes et dont l'ensemble des eaux, réunies en un ruisseau débitant 5 litres/seconde, permet l'alimentation de deux moulins ;

par contre, la petite source *Thévenar* se perd dans un marais, et ses eaux n'arrivent que partiellement au Tillet ;

il en est de même de l'*Angolet*, ruisseau dont le débit peut atteindre 20 litres /seconde, et qui va se perdre au sud du hameau de Mentens, commune de Moux ;

Au-dessous des hôtels, coulent des ruisselets qui franchissent la falaise valanginienne sous le nom de *Cascade du Ru*; le ruisseau qui se réunit à son pied et s'appelle le *Colin* traverse une deuxième cascade dans le calcaire urgonien, au-dessous de la chapelle Saint-Victor; les eaux qui en sortent se réunissent à celle du *ruisseau des Corbières*, et c'est cet ensemble qui va fermer le *Ru des Moulins*, dont nous verrons le rôle perturbateur vis-à-vis des eaux d'Aix dans le chapitre suivant; il tire son nom des moulins à huile Fressette, délabrés et rudimentaires, qu'il fait tourner, et traverse le village de Mouxy sur un lit poreux dans l'alluvion où il perd une partie de son volume par infiltration; aux époques pluvieuses, bien qu'il ne reçoive aucune source importante, ce ruisseau arrive jusqu'à Aix, où il est canalisé, et rejoint le Tillet; il peut rouler alors jusqu'à 5.000 litres/seconde, tandis que les pertes de son lit poreux et mal colmaté pourraient absorber en totalité jusqu'à 50 litres/seconde;

4° au Nord-Ouest, le *Sierroz*, qui vient lui aussi se déverser près d'Aix, dans le lac du Bourget, naît à 1.500 mètres en amont du hameau des Favrins, au-dessus du *Col de la Cluse*, coule normalement à la direction du synclinal molassique et reçoit les eaux venues de deux sources, celles du *Pré Japert* et de la

(1) Tous ces points sont indiqués sur la planche annexée.

Mennaz; les premières, venant de l'Hauterivien inférieur (1 à 4 litres seconde), sont refoulées en partie pour l'alimentation des hôtels du Mont Revard; les secondes, moins importantes, naissent au pied de la falaise abrupte du Pré Jappert, alimentant un ruisseau qui rejoint le Sierroz au moulin Picolet.

Le Sierroz s'encaisse de nouveau dans les calcaires urgoniens à Grésy-sous-Aix, en aval de ce village il sort du synclinal molassique, contourne la pointe méridionale de l'anticlinal de la Chambotte et aboutit au lac entre les hameaux Chaudy et Puer, y apportant assez d'alluvions pour que son delta menace de couper le lac en deux bassins inégaux.

La quantité des eaux que débitent actuellement ces sources et ces résurgences est hors de proportion avec celles que le haut plateau sans écoulement du Revard est susceptible de recevoir et d'emmagasiner dans ses fissures et ses cours d'eau souterrains : il paraissait donc du plus haut intérêt de l'étudier tout spécialement, et il n'était pas impossible de le considérer comme le périmètre d'alimentation supposé des sources thermales; comme — à part la Doria de Saint-Jean d'Arvey — aucune résurgence n'a un débit suffisant pour restituer rapidement la coloration, et qu'aucune localité vraiment importante ne s'alimente sur l'une de ses émergences, on était dans les conditions parfaites de la réalisation d'une expé-

rience à la fluorescéine préconisée par l'Institut d'Hydrologie.

II. — *La méthode de diagnostic à la fluorescéine*

Principe de la méthode. — Il s'agit d'établir la réalité de la circulation entre les points d'absorption et les émissaires : il suffit d'individualiser les molécules liquides en les colorant, et en relevant la trace de leur passage dans les émergences étudiées.

Qualités de la coloration. — La substance utilisée doit être inoffensive, soluble, facile à retrouver à une dilution extrêmement faible, durable autant que possible : autrement, elle ne doit subir aucune altération dans son parcours souterrain, ce qui élimine la plupart des colorants, sauf la fuschine acide et la fluorescéine. Cette dernière est le plus souvent employée en raison de son extraordinaire puissance de coloration (telle qu'on l'y retrouve encore au taux de 1 200.000.000.000 deux ans après les colorations d'origine (1)).

On emploie ses sels alcalins, parfaitement solubles dans l'eau (2), qui donnent, en solution diluée, une

(1) Ce phénomène doit être dû à la fixation des matières verreuses colloïdales qui tapissent les diaclases des calcaires et ne restituent la couleur que par intermittence, par suite de modifications du complexe fermé et sous l'influence de variation de composition des eaux.

(2) Ce qu'on appelle fluorescéine est exactement, non cette substance, la tétra-oxyphthalophénone anhydride de formule brute $C^{20} H^{12} O^4$, qui est insoluble, mais un sel de soude de ce corps, d'abord dissous dans l'alcool additionné de 5 % d'ammoniaque, puis dans une quantité d'eau suffisante.

belle fluorescence verte typique, tandis qu'à l'état concentré elle colore l'eau en rouge.

Historique de la méthode

Proposée par KANDLER (1864), employée pour la première fois par KAPP (1877) (1), la méthode de la coloration à la fluorescéine a été étudiée en France par FERRAY (1887) (2), PACCARD (1893) (3), JEAUNAT et THOINOT (1894) (4), MARTEL (1897) (5) et, depuis, par un nombre considérable d'expérimentateurs qui se sont efforcés de perfectionner et d'hypersensibiliser la méthode (6).

Technique de la méthode

1. *Quantité de réactif.* — La quantité de fluorescéine est variable suivant les cas d'espèces, et c'est

(1) KAPP jeta 10 kilogs de fluorescéine dans les pertes du Danube entre Minendigen et Fridingen (Grand-Duché de Bade) et 60 heures après colora la source de l'Aach.

(2) FERRAY étudia spécialement la vallée de l'Avre (Bocage normand).

(3) PACCARD prouva la communication des entonnoirs de Boussat avec les sources de l'Orbe (Jura).

(4) JEANNOT et CHAINOT jettent 4 kilogs de fluorescéine dans le ruisseau de Nancray et 93 heures après obtiennent la coloration d'une source (Arnès) destinée à l'alimentation de Besançon, qui resta colorée pendant six jours.

(5) MARTEL prouve par la coloration de la source de la Sauve (Gard) que celle-ci est contaminée par un puits souillé de purin.

(6) En France, les noms de MARBOUTIN, DIENERT LE COUPEY DE LA FAERT ont multiplié les expériences dans la région parisienne, tandis que la Société Belge de Géologie, de 1901 à 1903, a fait une étude serrée de la méthode, résumée dans « L'Etude des Eaux Souterraines » (1904); TIRNUS a perfectionné le fluorescence et est parvenu à une extrême sensibilité.

l'expérience acquise par les précédentes recherches qui en est la meilleure indication; toutefois, on est parvenu à découvrir une formule simple, due aux recherches de M. DIÉNERT, permettant de se rendre compte de la quantité approximative de produits à employer.

Soient :

l mètres la distance du point de précipitations au point d'observation choisi;

Δ litres/seconde le débit des sources où le colorant est susceptible de réapparaître;

a litres/seconde le débit de l'eau dans laquelle le colorant va être projeté,
on aura le poids A grammes de celui-ci d'après la formule

$$A = \frac{K \Delta l}{a},$$

où K est un coefficient variable suivant la nature du colorant; en l'espèce, $K = 2,5 \times 10^{-4}$ pour la fluorescéine.

Au cas où le débit $a < 5$ litres/seconde, on doit multiplier A par $\frac{5.000}{a}$.

2. *La projection du colorant* doit être entourée de certaines précautions suivant les points où on opère.

1° S'il s'agit d'un cours d'eau superficiel à débit suffisant et continu, il n'y a pas de difficultés, il suffit de choisir un endroit propre, sans trop de végétation, et d'incorporer à l'eau courante le colorant dissous dans une quantité convenable et minima (par exemple, 1 kilog. dans 1 lit. 1/2 ou 2 d'eau bouillante) (1).

2° Si l'on a affaire à un cours d'eau temporaire, on se place dans des conditions telles qu'on puisse encore escompter une absorption d'un volume de 1 litre/seconde pendant les premières heures qui suivent la projection, on choisit une période de dégel, ou de fortes pluies.

3° Si la projection doit être faite dans un ruisseau disparaissant progressivement sans gouffre apparent, il faut se rendre compte que ce tarissement est bien dû à la porosité du lit, et faire l'expérience en amont de la perte, là où le courant d'eau est encore bien net.

4° Si, au moment de la projection, le ruisseau est encore capable de franchir son lit poreux, et de réapparaître plus loin, quoique diminué, il faut en isoler une portion en amont du cours poreux par un bâtardeau et y faire la projection.

(1) Comme il en reste un dépôt de fond moins soluble, on peut s'en servir en le reprenant par l'ammoniaque ou l'alcool dénaturé.

5° En cas de puits ou puisard, également en cas de gouffre ou bétoire (ainsi que de forages, ce qui ne nous intéresse pas), le succès de l'opération dépend de la quantité d'eau dont on dispose pour entraîner la matière colorante : plus le cours souterrain supposé est important, plus il faut d'eau de chasse ; aussi est-il nécessaire que l'orifice soit en état d'absorption depuis plusieurs jours et que l'on compte avoir devant soi plusieurs jours d'alimentation, car on pourrait perdre la coloration dans les fissures où l'eau s'arrêterait avant de reparaître au jour ; en cas d'accès d'eaux folles, on protège le bétoire par un bâtardeau afin que le colorant ne soit pas disséminé en surface.

Lorsque la projection a été effectuée, l'aide qui en a été chargé ne doit plus prendre aucune part aux manipulations, car la fluorescéine susceptible de l'avoir souillé se retrouvera ensuite continuellement par erreur.

Vitesse de translation de la coloration

Bien que la propagation de la fluorescéine mette un certain temps à parvenir aux points d'émergence, on commence les observations dans les heures qui suivent la projection eu égard à la distance qui sépare les points d'observation du point d'émission.

Cette propagation n'est d'ailleurs pas animée d'une vitesse uniforme, elle ne se fait pas d'un bloc, et elle subit dans les diaclases une sortie d'étirement, où les filets formant le centre de la veine liquide colorée progressent plus vite que les filets périphériques que retardent le frottement contre les parois, le remplissage de diverticules et de culs-de-sacs des cavités souterraines, l'inégalité de certains points des dilutions.

L'ordre de grandeur des vitesses de propagation est très variable; on s'en rend compte en notant avec précision la distance séparant les points d'observation du point de coloration, et le temps que la fluorescéine a mis à parcourir cette distance, c'est-à-dire le temps écoulé entre le moment du début de la précipitation et celui où apparaissent les premiers filets

IMBEAUX donne une explication théorique qui permet *a priori* de se rendre compte de l'importance de ces retards : soit une tranche de terrain (figure) comprise entre deux sections transversales *ad* et *bc* au poste A; ce bloc coloré se déforme en s'écoulant vers l'aval; d'une part, le glissement des filets les uns sur les autres va l'« emboutir » et en faire un cornet limité par la surface *a'bf'c'd'e'a'* convexe vers l'aval. D'autre part, les composantes obliques des vitesses faisant passer des molécules colorées dans l'eau pure et réciproquement, ce mélange a pour effet de gonfler la masse colorée et inégalise l'état de dilution. Aussi le passage de la vague colorée au point d'observation B peut durer assez longtemps, et l'intensité de la coloration sera variable dans une même section, et de celle-ci à la voisine, ce que montre l'établissement en B d'une couche d'intensité des colorations en B d'après le temps, le début de la coloration correspondant à la vitesse maxima, et le maximum de celle-ci au plus grand afflux du liquide. On en déduit que la fluorescéine doit être déversée dans toute la tranche intéressante, de façon continue et assez lente.

liquides colorés; on obtient ainsi, en joignant les différents points où la coloration est arrivée au même temps, des courbes que LÉON JANET appelle « isochronochromatiques », qui donnent une idée de la répartition dans le sous-sol de l'eau absorbée en un point limité de la surface. De telles courbes sont construites pour des durées variables, par exemple 10, 20, 30 heures, si on manque de renseignements (absences de puits ou d'émissaires), on est obligé de se rapporter à la carte géologique et de procéder par interpolations, mais ces cartes n'ont vraiment de valeur que si elles s'appuient sur un grand nombre d'observations.

De façon générale, l'eau circule plus vite en terrain calcaire fissuré que dans les formations plus cohérentes, le chiffre moyen des vitesses enregistré est de 500 à 3.000 mètres par 24 heures (1).

L'observation de la coloration

On établit les postes d'observations avant la projection du colorant, et ceux-ci sont alertés dès qu'elle est faite; en commençant à partir de la troisième

(1) GUILLERT a noté 40 mètres/24 heures dans les calcaires lutéciens de la vallée du Durteint, la coloration s'étant maintenue pendant une année, et par contre 10 kilomètres en 24 heures dans la vallée de la Voulzie (Bassin Parisien); enfin, dans les alluvions, la vitesse peut ne pas dépasser 1 mètre/jour. — DIENERT et GUILLERT études des sources de la Région de Provins, *Annales de Montsouris*, tome XII, 1912-13.

heure, on peut, suivant les vitesses supposées de propagation, faire des prélèvements qui sont faits :

toutes les 3 h. pour des vitesses de 6 à 4 km. p. 24 h.

— 2 h. — 4 à 2 km. —

— 3 h. — 2 à 0,5 —

— 6 ou 12 — < 0,5 —

En cas d'expérience à courte distance, les observations sont faites :

toutes les heures pendant le premier jour;

toutes les 3 heures pendant le deuxième jour;

toutes les 6 heures pendant le troisième jour;

une fois par jour à partir du quatrième jour.

Enfin, si l'on veut éviter des prélèvements nocturnes, il suffit de faire deux jets de matière colorante à douze heures d'intervalle.

Quelques causes de difficultés

Avant de passer à l'examen des échantillons prélevés et étiquetés, il faut se méfier de quelques causes d'erreur :

1° la coloration diluée est difficilement décelable dans l'eau trouble; aussi sera-t-il utile de la filtrer;

2° l'acide carbonique libre (fréquent dans les eaux des terrains granitiques ou siliceux) détruit assez rapidement la fluorescéine qu'on peut régénérer en ajoutant quelques gouttes d'ammoniaque qui fixe le gaz carbonique et précipite le carbonate de chaux;

3° la tourbe (par ses acides humiques) et certaines argiles détruisent aussi la fluorescéine;

4° la lumière du soleil enfin décompose rapidement la coloration, et une exposition de trois heures au soleil suffit pour détruire une solution à $1/100.000.000$, non décelable au fluorescope; aussi faut-il conserver les flacons à l'ombre.

Mise en évidence de la fluorescéine

L'œil nu permet encore de déceler une dilution au $1/10.000.000$, tant est grande la sensibilité de la fluorescence. Mais au delà, on peut user des appareils dus à TRILLAT et SCHARDT permettant de mettre en évidence des dilutions encore plus faibles (1) :

1. *Difficultés de l'examen au fluorescope.* — On doit comparer à chaque échantillon d'eau supposée colorée un échantillon témoin d'eau prélevée

1. *Le Fluorescope de TRILLAT* permet d'aller jusqu'à $1/1.000.000.000$, en cas d'eaux très claires, mais le plus souvent on ne peut dépasser $1/500.000.000$; cet instrument se compose essentiellement d'un tube en verre blanc ou en cristal, d'une longueur de 1 mètre sur 2 centimètres de diamètre, fermé d'un côté par un bouchon noirci à la plombagine et contenant 300 cm^3 d'eau; par l'autre extrémité, on peut déceler la présence de fluorescéine (sous réserve de certaines fluorescences naturelles des eaux).

On peut perfectionner l'appareil en lui ajoutant un second tube comparateur, contenant de l'eau naturelle connue, ou même en réunissant une batterie (*), dont on élimine le plus souvent 50 %, qui donnent des colorations propres très différentes, ne conservant que ceux qui donnent une teinte comparable.

avant l'expérience à chaque poste d'observation, et le fluorescope témoin est constamment comparé aux haut (voir pp. 82 et suiv.) : de la présence d'infiltrations riches en matières organiques ou chlorures qui donnent aux eaux une teinte verdâtre.

2. *Fluorescope électrique de Diénert.* — Ce procédé consiste à utiliser le faisceau lumineux d'une lampe à arc, placé au foyer d'une lentille convergente; les rayons parallèles sont reçus par une seconde lentille qui concentre les rayons en son foyer où on place l'eau à examiner dans un petit flacon de 45 cm³ qui s'illumine d'un rayon vert dès que l'eau contient 1/200.000.000 de fluorescéine.

Ce procédé, beaucoup plus sensible, permet l'étude de la fluorescence naturelle des eaux, mais les flacons doivent reposer quelques heures pour permettre le dépôt des particules en suspension, qui produisent cette fluorescence naturelle et masquent l'action de la fluorescéine qui s'en distingue par l'atténuation de la

Le Fluorescope de SCHARDT est un tube à essai de modèle courant, long de 20 cm., sur lequel a été collée une gaine de papier noir n'offrant le long d'une génératrice qu'une mince lumière d'un millimètre de large; lorsqu'on regarde l'instrument, ainsi très portatif et ne nécessitant que peu d'eau, par en dessus, la fluorescéine s'y révèle sous forme d'un pinceau lumineux vert; ce fluorescope est aussi sensible que celui de TRILLAT, si on dispose d'un bon éclairage.

* TRILLAT. Essai sur l'emploi de matières colorantes pour les recherches des Eaux d'infiltration. *Annales Institut Pasteur*, 1899.

MARBOUTIN emploie 12 tubes de façon à avoir réunis les prélèvements des 12 premières heures.

teinte quand on interpose un verre rouge dans le trajet du faisceau lumineux. On peut aussi observer le faisceau à l'aide d'un prisme biréfringent placé à on voit alors deux images du foyer : l'une, l'image 20 cm. du foyer et perpendiculairement au rayon : ordinaire, est un mélange des rayons de lumière diffusée par les particules et par des rayons omis par la substance fluorescente; l'autre, l'image extraordinaire, est surtout formée par les rayons fluorescents, car la lumière diffusée par les particules est en majeure partie polarisée et arrêtée par le prisme.

A l'avantage de cette sensibilité, le fluorescope électrique ajoute la rapidité d'examen, le faible volume d'eau demandé et la possibilité d'examen à la lumière artificielle.

3. *Concentration de la fluorescéine.* — En cas de solutions extrêmement diluées, et qui n'ont donné aucune fluorescence à l'arc, on emploie des procédés d'enrichissement qui ont été indiqués par DIÉ-NERT (3); on arrive ainsi à caractériser 1 gramme

(1) DIENERT prépare du sable de Fontainebleau en le lavant à l'hypochlorite de soude, puis par l'acide chlorhydrique, puis à l'ammoniaque et de nouveau à l'acide afin que les eaux de lavage ne donnent plus à l'arc la moindre trace de fluorescence; le sable est calciné, 150 grammes sont disposés sur un entonnoir où on filtre 2 litres d'eau suspecte acidulée par 5 cm³ HCl (2,5 %). Le coefficient de vide du sable étant de 1/3, l'entonnoir retient 50 cm³ d'eau acidulée; le sable est traité après filtration parfaite par de l'eau ammoniacale à 10 %, et le premier tiers de l'eau d'imbibition recueillie est examiné à l'arc, contenant la totalité de la fluorescéine contenue dans les 2 litres d'eau.

de fluorescéine dans 100.000 tonnes d'eau, soit $1/100.000.000.000$.

Les postes d'observation

On plaça sur chacune des vallées considérées comme les émissaires de la couche du terrain étudié un poste d'observation (qui, pour le cas, fut confié à des gardes forestiers), qui reçut le flaconnage nécessaire pour faire un prélèvement quotidien pendant vingt jours (ce qui permet l'observation d'une vitesse de propagation de la couleur de 0 km. 4 par jour. vement quotidien pendant vingt jours (ce qui permet l'observation d'une vitesse de propagation de la couleur de 0 km. 4 par jour).

Comme ces observations étaient faites au moment du maximum des débits des sources, c'est-à-dire à la fonte des neiges, il était probable que les postes d'observation recueilleraient de l'eau de rivière en crue trouble et où la fluorescéine, même observée à l'arc électrique, aurait été fort peu décelable; aussi chaque poste doit être muni d'un dispositif permettant d'obtenir de l'eau clarifiée, basée sur l'emploi de carafes en grès filtrant (type de Mallié), qu'il suffit de plonger dans un seau rempli de l'eau à observer.

LOMBARD, Recherche de la fluorescéine dans les solutions très étendues. *Bull. Soc. Chim.*, 30-9-1921, 4^e série, tome XXIX

III. — LES RÉSULTATS

A) *Etude de la circulation urgonienne*

a) *Considérations théoriques.* — L'étude géologique du plateau du Revard nous a montré (chap. I et II) que la circulation souterraine des eaux ne se fait pas dans les marnes ou marno-calcaires hauteriviens imperméables, qu'elle est absolument nulle dans les marnes imperméables du Valanginien inférieur, qu'elle est peu importante dans la molasse tertiaire, constituant avec le flych à écailles de poissons un niveau peu perméable; ensuite, elle est déjà plus développée dans les grès sableux à bancs marneux et dans les calcaires à polypiers de la base du tertiaire; mais alors, ce sont surtout des phénomènes de surface, un ruissellement abondant, de petites prairies humides, une circulation souterraine nulle.

Il reste donc à envisager les terrains du Valanginien supérieur très fissurés et perméables, et surtout la grande masse du calcaire urgonien, où s'est développée une circulation souterraine typique de type karstique jurassien, avec ses grottes, des entonnoirs, résurgences, bout-du-monde, etc. C'est de cette circulation que nous allons nous occuper ici.

Les entonnoirs d'absorption, qui alimentent cette circulation sont situés sur les affleurements de calcaire

urgonien et ont été figurés sur la carte au 1/20.000 (GOTTELAND et DOLIN) et même dans certains points (région de la Feiclaz), où le sol est tertiaire, des entonniers localisés indiquent des effondrements du calcaire urgonien sous-jacent et miné par l'action des agents météoriques, que sa mince couverture oligocène n'avait pas suffi à protéger.

La descente des eaux infiltrées est arrêtée à la base de l'Urgonien par les couches imperméables, marneuses de l'Hauterivien, au-dessus desquelles une seconde assise fissurée, les calcaires blancs du Valanginien supérieur, forment une zone de circulation complètement séparée de la précédente.

Voilà donc les points d'absorption du calcaire urgonien; quels sont maintenant ses émissaires? Deux résurgences importantes apparaissent dans la région méridionale du Revard, au-dessous de cette petite chaîne qu'on appelle les Monts Pennay; c'est la Doria (entre le Mont Pennay et le Nivollet) et Fontaine Froide, en face le hameau de Fougères, dont nous avons déjà parlé plus haut; ces deux sources apparaissent naturellement à la base de la falaise urgonienne, au contact de l'Hauterivien marneux (1).

L'abondance du débit de la Doria nous a été expli-

(1) Plusieurs grottes situées dans la falaise, au-dessus de la Doria, représentent l'emplacement d'anciennes résurgences, aux époques où l'évolution du réseau hydrographique était moins avancée qu'aujourd'hui (MARTEL).

qué par sa présence, à la base, de l'Urgonien qu'intéresse là le pli de la faille du Mont Pennay, tandis que Fontaine Froide, située à une altitude bien moins élevée, ne débite qu'une partie des eaux urgoniennes, la plupart ayant été canalisée par le noyau anticlinal du Mont Pennay vers la source de la Doria.

Donc on devait à priori penser que les eaux infiltrées dans toute la surface urgonienne du plateau du Mont Revard devaient réapparaître soit à la Doria, soit à Fontaine Froide, pour aboutir finalement à la Leysse, et que toutes les eaux reçues à l'ouest de l'anticlinal du Mont Pennay devaient aller à la Doria et les autres à Fontaine Froide.

b) *L'expérience de Rethiède*. — Rethiède étant situé à l'ouest du noyau du Mont Pennay, d'après les considérations émises plus haut, était un point fort bien choisi pour une expérience, d'autant que sa position en contre-bas draine à la fonte des neiges une grande quantité des eaux superficielles.

L'expérience fut faite le 8 mai 1927 ; des postes d'observation furent établis en sept points différents : sur le Ru des Moulins, à Mouxy, à 5 km. de Rethiède ; au Moulin Picolet, sur le Sierroz, à 8,5 — à Saint-François, sur le ru Saint-François, à 7 km. de Rethiède ; au Pont de Lasse, près Villaret, sur la Leysse, à 8,5 de Rethiède ;

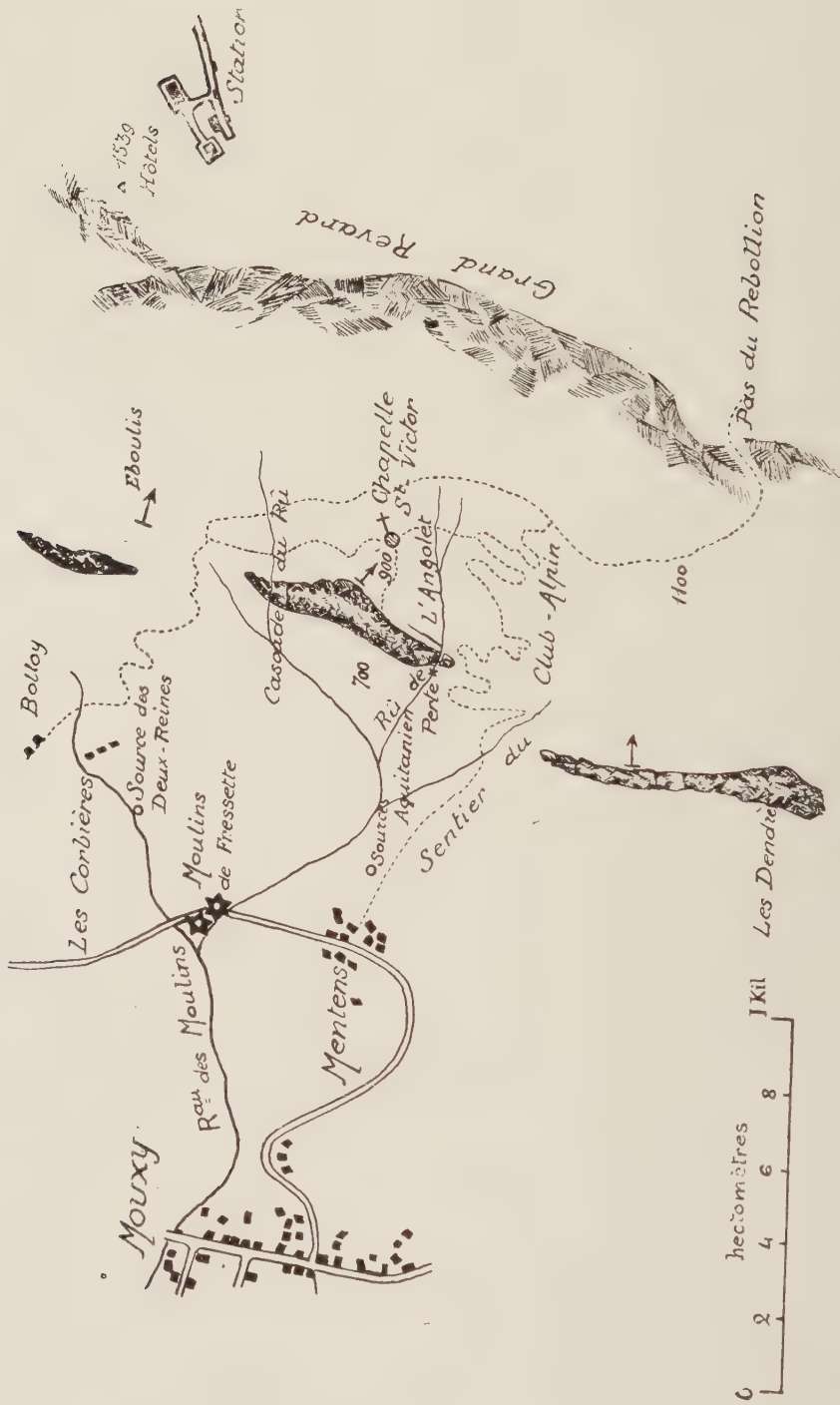
au Vivier du Lac, sur le Tillet, à 8,5 de Rethiède;
à la Source des Deux-Reines (une des origines du Ru
des Moulins), à 3,5 de Rethiède;
à la Source du Pré Japert (origine du Sierroz), à 4,5
de Rethiède; (2)

Dès le 9 mai, à 16 heures, le Pont de Leysse signalait le passage de la fluorescéine provenant du torrent de la Doria, dont la distance au creux de Rethiède est de 5 km. 5, que l'eau colorée mit à peu près une journée à parcourir; la coloration fut constatée sur tout le parcours de la Leysse jusqu'à Chambéry, tandis que les eaux thermales observées de façon continue restèrent indemnes, et que nul des autres postes d'observation, fonctionnant pendant vingt jours, ne put constater la fluorescéine.

La conclusion de cette expérience est indubitablement que les eaux tombées sur les hauts plateaux urgoniens du Revart méridional ne peuvent alimenter les griffons thermaux.

c) *L'Urgonien du flanc occidental du Revard.* — Cet affleurement de calcaire urgonien, depuis longtemps signalé par les géologues et qui a fait l'objet d'une étude de Roch a été décrit dans un chapitre précédent. M. GIGNOUX suggérait que c'est dans cette

(1) 10 kilogs de fluorescéine dissoute dans 42 litres d'eau.



bande de rochers surgissant au delà du synclinal mollassique de Mouxy-Pugny que pourraient bien s'infiltrer les eaux destinées à alimenter les griffons thermaux d'Aix; aussi attirait-il l'attention de l'Institut d'Hydrologie, qui s'est demandé s'il était possible de trouver quelque fissure ou quelque gouffre susceptible d'absorber la fluorescéine. Cette barre rocheuse est franchie en cascade par deux ruisseaux, l'Angolet au Sud et le Colin (issu lui-même de la Cascade du Ru) au Nord (voir plus haut).

Le Colin, dont la cascade disparaît à peu près en saison sèche, franchit la barre urgonienne d'une hauteur d'une trentaine de mètres, et reçoit l'émissaire d'une petite source avec lequel il forme le ruisseau des Corbières qui ne tarde pas à se perdre sur la mollasse.

L'Angolet se perd dès la cascade en saison sèche, à la fois sur des éboulis rocheux et sur de hautes prairies établies elles-mêmes sur des éboulis, ainsi que l'a constaté FLANDRIN, qui a découvert en dessous de la cascade une fissure de 5 à 10 mètres de largeur dans la masse calcaire, permettant d'expliquer en partie les pertes d'eau qui se continuent dans l'Urgonien sous-jacent aux éboulis, tandis qu'un peu plus loin, sur une distance de 150 à 200 mètres, il n'est plus possible de trouver de démarcation entre le calcaire et la mollasse.

La fissure signalée ne paraît pas absorber beaucoup du débit, qui, en septembre 1929, de 15 litres/seconde disparaissait à peu près totalement sur un parcours de 800 mètres, en amont de Mentens; nulle part il ne fut possible de trouver une fissure susceptible d'absorber la fluorescéine.

B) *Etude de la circulation valanginienne*

Les calcaires valanginiens forment une grande partie de la crête du Revard; notamment dans la région avoisinant les chalets au trou Souffle-Cendre, tandis que l'effondrement qui s'est récemment produit sur la piste de ski se trouve dans la zone d'affleurement des marnes hauteriviennes : mais il n'en a pas moins pour cause l'affouillement des calcaires valanginiens sous-jacents, que les marnes avaient recouverts d'une mince couverture.

Toutes les sources qui sourdent au pied de la falaise valanginienne, sur le versant occidental du Revard, sont des résurgences de ces eaux engouffrées, telles sont la Meunaz, le Pré Japert, l'Angolet et toutes les eaux se dirigeant vers le Ru des Moulins ou le Tillet.

L'Institut d'Hydrologie décida d'étudier le fonctionnement de cette résurgence pour savoir si les marnes valanginiennes qui sont sous-jacentes aux calcaires

ne permettraient pas la perte des eaux descendues dans le Jurassique; il choisit donc l'un des entonnoirs voisins de l'hôtel du Revard comme point de précipitation du colorant, et comme postes d'observation :

le moulin Picolet sur le Sierroz;

Mouxy sur le Ru des Moulins;

le Vivier, sur le Tillet;

le pont de la Leysse (où les eaux pouvaient venir au-dessous du confluent de la Doria, mais avec une dénivellation de 600 mètres par rapport à cette résurgence) ;

le ruisseau de Saint-François;

les eaux thermales;

la source du Pré Japert;

la source des Deux-Reines.

Le 20 avril 1928, aussitôt après la fonte des neiges, une dissolution de 10 kilos de fluorescéine fut projetée dans l'entonnoir précédemment choisi, et les pluies abondantes qui suivirent contribuèrent à l'entraînement et à la dispersion de la couleur; or, aucun des prélèvements qui furent effectués à tous les points précités et examinés à Paris à l'arc électrique n'a montré de trace de fluorescéine, encore qu'ils fussent poursuivis pendant 75 jours.

En conclusion de cette expérience, les eaux infiltrées dans les calcaires valanginiens du grand Revard, et

qui ne peuvent communiquer avec les fissures urgoniennes, dont elles sont séparées par l'épaisse assise imperméable des marnes hauteriviennes, ne ressortent pas dans les falaises occidentales de la crête, et n'alimentent ni la Menaz ni les petits affluents du Tillet.

C) *Circulation mollassique*

Formé de grès, de calcaires gréseux, de schistes à écailles de poisson — c'est la molasse typique — ou bien d'alternance de grès sableux, de bancs marneux et de conglomérats calcaires, l'oligocène du bassin des Déserts est en somme peu perméable et ne se prête à aucune observation intéressante.

Par contre, bien que présentant à peu près les mêmes caractères, la molasse du synclinal de Mouxy offre un tout autre intérêt, surtout à son voisinage immédiat des eaux thermales; elle est située en contrebas de la barre urgonienne que nous connaissons, où il n'a pas été possible de trouver un déversoir adéquat à la coloration, et c'est encore une énigme que la profondeur du synclinal tertiaire peut être accidentée d'une surface de chevauchement importante (ainsi que le pense KILIAN (Cf. chapitre VII).

Or, ces observations de l'Institut d'Hydrologie l'ont amené à préciser l'existence d'une dépression recombée depuis longtems, au lieudit Puits Maillard, mais

où ces eaux s'absorbent comme versées dans un entonnoir; cet entonnoir est situé dans la zone d'éboulis qui recouvre la molasse, à peu de distance de la barre d'Urgonien que le ruisseau de Colin (voir plus haut) vient de franchir en cascade et de la source Maillard formant un ruisselet (2 litres/seconde) qui s'absorbe temporairement dans l'entonnoir.

Le jet de la coloration précédé par le détournement du ruisseau issu de la cascade du Colin est dirigé vers l'entonnoir du Pré Maillard, tandis qu'un certain nombre de points sont choisis (sources, fontaines, lavoirs) à Mouxy, à Mentens et à Aix; ensuite on fit absorber pendant six heures le ruisseau par l'entonnoir, et on y introduisit une dilution de 4 kilos de fluorescéine : quelques instants plus tard, la fluorescéine reparaisait à 200 mètres de là dans le lit du ruisseau et dans une sourcelette voisine (source Exerties) ; quelques heures plus tard, elle apparaissait à un lavoir situé entre Mouxy et Mentens (900 mètres de l'entonnoir) et à la source du Pré Robert (15 litres/seconde, même distance), tandis qu'aucun autre point examiné ne fut atteint: cette expérience montre évidemment que la molasse est sujette à une circulation souterraine peu profonde, vraisemblablement coulant sous la couverture d'éboulis, et par conséquent incapable de toute contribution au débit des eaux thermales.

D) *Circulation glaciaire*

Les alluvions glaciaires ont une composition extrêmement hétérogène où les énormes blocs erratiques, les galets roulés, les graviers morainiques et les sables torrentiels alternent avec des argiles fines contenant des galets — l'argile à blocs des géologues. L'ensemble est poussé sur le « mar », conglomérat extrêmement dur, provenant du cimentage des galets par l'action des torrents et des cours d'eaux sous glaciaires.

Il n'y a aucune stratification dans ces matériaux, car ils correspondent aux derniers épisodes d'avancée et de retrait de la glace; de leur superposition irrégulière, résultent des couches imperméables retenant de petits plans d'eaux à différentes hauteurs, et on voit une nappe de détail venir au jour, donner une source, ruisseler en surface grâce à l'affleurement d'une couche imperméable, se réinfiltrer pour former une autre nappe, réapparaître et ainsi de suite; tels sont les « renaîts » causés par la disposition étagée des niveaux piézométriques.

C'est ainsi que le fameux Ru des Moulins, qui tire son origine des cascades du Colin et du ruisseau des Corbières, traverse Mouxy en un lit encaissé et profond comme une vraie rivière et, ayant recueilli de nombreuses souillures (1), il ne tarde pas à s'absor-

(1) A quelque distance de Mouxy, un siphon métallique avec décharge fait franchir le ru au Captage Boffert, établi pour Aixelles-Bains dans les cailloux glaciaires de la commune de Mauxy.

ber par un lit poreux, fissuré, mal colmaté; cette absorption, nous l'avons vu plus haut, peut atteindre 10 litres/seconde; il est vrai que, en période de crues, le Ru des Moulins peut donner jusqu'à 1.000 litres-seconde; aussi, progressivement son lit l'absorbe-t-il en saison sèche, et ce ruisseau disparaît complètement sans qu'on puisse dire où.

Malgré un cimentage de son lit, le ru disparaît au pont de Mouxy; il réapparaîtra en amont d'Aix, à quelque distance de là.

Où pouvait aller l'eau du Ru des Moulins? C'est la question que s'est posée l'Institut d'Hydrologie, qui fit projeter 1/2 kilo de fluorescéine en amont et 1/2 kilo en aval du pont de Mouxy, au tarissement terminal du Ru des Moulins; à moins d'une heure un quart après la projection, la couleur était signalée par les habitants d'Aix dans leurs eaux potables, et, le lendemain, à la source du Pont de Bois.

Cette expérience montre donc la circulation des eaux dans le cailloutis glaciaire, et l'absence totale de protection de la distribution urbaine tributaire du captage Baffert, qui fut dès les premières heures très puissamment coloré par la fluorescéine; le temps de parcours dans le glaciaire fut évalué à 1 kilomètre en 24 heures.

Enfin la coloration de la Source du Pont de Bois indique que les eaux glaciaires avaient passé dans l'Urgonien, donc qu'elles étaient susceptibles d'atteindre la nappe thermale.

D) *Conclusion*

L'ensemble des études poursuivies par l'Institut d'Hydrologie sur la circulation des eaux d'Aix, si elles ne nous ont pas donné la clé de l'énigme, n'en ont pas moins permis de localiser le problème; nous savons maintenant, sans erreur, que les hauts plateaux du Revard, non plus que sa crête extérieure, ne peuvent recevoir et emmagasiner les eaux qui deviendront thermales, et que la molasse et le glaciaire sont le siège d'une circulation souterraine qui peut troubler jusqu'à un certain point les sources minérales, mais nous n'en connaissons aucune donnée nouvelle, et le problème demeure entier.

La constatation la plus curieuse est évidemment celle qu'a montrée la circulation valanginienne: l'absorption de l'eau colorée par les fissures de la crête du Revard a été définitive; on n'a revu nulle part la fluorescéine; aussi les eaux ont-elles dû trouver en profondeur des solutions de continuité dans les assises imperméables de l'Hauterivien.

C'est donc qu'il faudra s'attacher à l'étude du synclinal molassique, à propos duquel nous avons déjà vu que LONG et WILM avaient suggéré l'hypothèse d'une surface de chevauchement favorisant la remontée des eaux thermales.

CHAPITRE IX

RÉSULTATS DES OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES

Les abords immédiats des sources

L'étude du débit fut accompagnée de celles des variations des plans d'eaux froides aux abords des grifons thermaux. On en repéra la température, le débit et la hauteur par rapport à un repère fixe; on en fit l'épreuve de la résistivité électrique et quelques analyses sommaires. Ces points sont :

— le Ru des Moulins, cote 320-320, à 300 mètres d'Alun, dont le débit, pour atteindre 80 litres/seconde et tomber ensuite à 0, qui est soupçonné, à cause de la mauvaise étanchéité de son lit canalisé en partie seulement d'être le principal facteur de pollution;

— le ravin du Pont de Bois, cote 297, ancien lit du Ru des Moulins, émissaire encore d'une petite nappe, car son faible débit de 0,16 à 1,5 litre/seconde ne tarit jamais;

— la Source Bias, cote 325, vieux captage dans le glacier à 320 mètres d'Alun, et qui a été accusée de créer des désordres dans les soutènements du réservoir de la Villa des Eaux; ses eaux recaptées sont visibles par un regard situé à proximité du réservoir; cette source a un débit de 1 à 5 litres/secondes et représente le type des eaux glaciaires;

— tout près de la Villa des Eaux, bâti sur l'Urgonien, à 50 mètres de la Source Bias, le puits Damesin, la profondeur de 8 mètres dans le glacier; situé à la cote 335, à 280 mètres d'Alun, atteint déjà

— le puits Girard, cote 360, à 660 mètres d'Alun, au delà du funiculaire du Revard, a dans le glacier une profondeur de 7 mètres; en hautes eaux il déborde et coule à la surface;

— le pré Voguet est une région humide parcourue par un courant d'eau temporaire qui peut débiter jusqu'à 20 litres/seconde; il semble que ce soit l'exutoire d'un vieux drainage glacier qui descend dans la pente située au-dessus du Splendid Hôtel et du réservoir de la Grimolière (de 330 à 315 mètres);

— les trois réservoirs de distribution d'eau, qui sont : la Villa des Eaux (332 m.), la Croix de Chenoz (330 m.), la Grimolière (310 m.), reliés entre eux deux à deux et pourvus de trop-pleins;

— juste au-dessus des sources thermales, les dominant d'une quinzaine de mètres, se trouve l'importante propriété Chevalley, située sur un glacier de

faible épaisseur. Cette propriété constitue l'un des plus graves dangers de contamination des eaux thermales et a fait l'objet d'une étude spéciale de l'Institut d'Hydrologie.

La propriété Chevalley.

L'eau thermale menacée de souillures organiques.

Cette propriété comprend :

1° une ferme avec fumier et poste de W.-C. sous fosse, dont les produits usés sont épandus tout autour de l'exploitation, sauf au Nord, à la suite d'un arrangement avec le Splendid-Hôtel, du côté de cette propriété;

2° la maison du garde, qui ne possède pas de poste de W.-C., les fèces étant répandues au seau dans les jardins entourant cette maison;

3° la villa, qui possède un poste de W.-C. avec chasse d'eau, une fosse d'aisance de 12 m³ munie d'un trop-plein par lequel les liquides gagnent la fosse à terreau non septique du jardinier, et reçoit de plus les eaux pluviales venant d'une partie du toit représentant 70 m² de surface.

Cette fosse est remplie par 170 mm. d'eau de pluie; or, il en tombe annuellement 1.200 mm. et surtout à l'automne, après l'occupation estivale de la villa; aussi, chaque averse provoque le débordement de la

fosse septique, et les eaux polluées vont s'infiltrer sur un terrain qui n'est distant horizontalement que de 55 mètres d'Alun, et la surplombe de 10 mètres.

La fosse est vidée annuellement au seau (ce qui paraît peu pratique, car elle contient 12.000 litres) et le produit en est épandu sur le potager entourant la villa, et qui n'est situé qu'à 25 mètres d'Alun en distance horizontale.

Dès l'abord, il apparaissait que les nuisances de cette propriété étaient l'une des plus graves causes de contamination des eaux d'Aix, et pour le prouver, l'Institut d'Hydrologie a déversé 250 grammes de fluorescéine dans des eaux glissant le long du chemin de la Canotière — celui-ci faisant la limite de la propriété Chevalley au Sud et passant un peu plus bas à une dizaine de mètres horizontalement d'Alun; ces eaux provenaient d'une borne-fontaine et coulaient avec un débit appréciable de 0,5 litre/seconde pour s'absorber définitivement à 100 mètres en dessous du portail de la ferme Chevalley et à 170 mètres d'Alun.

Cette expérience fut parfaitement démonstrative; ces eaux colorées teintèrent Alun à deux reprises : à la 31^e heure et à la 52^e, établissant une correspondance probable avec deux points d'infiltration distincte; cette expérience témoigne indubitablement de la porosité de la zone et du lourd danger qui menaçait l'eau thermale.

Oscillation rythmée de la température

des griffons thermaux

Le réservoir de la Grimotière. — Dès le début des observations de température, on avait pu entrevoir sur les graphiques retirés des appareils enregistreurs une oscillation quotidienne et faible de la température, d'ailleurs d'amplitude variable. Son origine avait paru pouvoir être attribuée à la fusion diurne de la neige en hiver ; mais le phénomène s'est renouvelé en été, et le professeur BORDAS a été amené à étudier si on ne pouvait le rapporter à des phénomènes tels que les éclusées rythmiques des moulins ou même à un phénomène météorique, tel que l'absorption par le sol de la vapeur d'eau de l'air.

Cette perturbation fut spécialement observée pendant les années 1926-28 et y fut relevée quotidiennement.

L'amplitude de l'oscillation est de 2° en 24 heures, le maximum étant à minuit et le minimum à midi ; elle apparaît même si la température est en variation continue, et ne disparaît que très rarement, quelques jours, en janvier 1927 et en janvier 1928, correspondant à des périodes de fortes gelées.

Une variation analogue, d'une amplitude très affaiblie, 1/2 degré, affecte suivant la même allure les eaux de Soufre.

En février 28, malgré la chute de 130 mm. d'eau correspondant à une baisse de température de 40° à 30° et au débordement du puits Girard, l'ondulation rythmée peut encore être observée, les deux phénomènes s'additionnant.

Or, en mars 1928, tandis que le temps s'était maintenu au sec depuis une cinquantaine de jours, on note brusquement l'élévation de la température d'Alun passée de 39° à 43°. L'administration de l'établissement thermal, frappée de ce phénomène, put apprendre que, la veille de cette variation, les Services des Travaux publics avait fait mettre à sec le réservoir de la Grimotière, de 690 m³ de capacité situé à 200 mètres au sud-est d'Alun qu'il domine de 27 mètres et dont le trop-plein est constitué par une conduite en poterie venant rejoindre les égouts municipaux : on a tout de suite supposé que la rupture de cette conduite pourrait causer l'absorption dans l'Urgonien de ses eaux ainsi transmises aux griffons thermaux. Une expérience a montré qu'il en était bien ainsi et qu'effectivement c'était ce réservoir de la Grimotière qui provoquait l'oscillation rythmée de la température : en effet, qu'on remplit à nouveau le réservoir et qu'on provoque artificiellement le fonctionnement du trop-plein (différence entre le début des sources alimentant le réservoir et la consommation urbaine, dont la valeur est évidemment maximum dans la nuit, où

personne n'use d'eau), les premiers signes de la perturbation sont transmis en 6 à 7 heures, le minimum de baisse est de 2° au bout de 12 heures ; l'enregistrement de la perturbation donne une courbe ondulante, puisque la perturbation est progressivement montante et descendante.

Il est facile de prévoir théoriquement que cette variation se suivra encore pendant les grandes perturbations ; en effet, supposons à 9° l'eau du réservoir, qui ne représente qu'une faible portion du débit d'Alun ; soient a ce débit et b le débit des eaux provenant du réservoir et passant dans Alun.

$$a (43^{\circ}5 - 41^{\circ}5) = b (41^{\circ}5 - 9)$$

$$a$$

$$— = b.$$

$$16$$

Donc la perturbation causée par le réservoir de la Grimotière n'entre que pour une faible part, mais n'en est cependant pas moins négligeable.

Quelques grandes perturbations observées

Parmi les rapports annuels qui rendent compte des observations de la mission de l'Institut d'Hydrologie, on a pu noter un certain nombre de points, au cours des grandes perturbations des sources, qui en expliquent suffisamment la genèse et le fonctionnement.

1° *Perturbation de l'automne 1924.* — Cette année-là (qui fut pluvieuse), les sources thermales eurent, à partir du mois de juin, leur régime de saison sèche; la température d'Alun était au voisinage de 45° , celle de Soufre à 41° . Le plan d'eau de l'alluvion glaciaire, représentant le plan de la nappe hydrostatique, s'est abaissé régulièrement.

En mai, le puits Damesin avait son niveau à 3 m. du sol; le 10 septembre, à 6 m. 80.

En mai, le puits Girard avait son niveau à 0 m. 75 du sol; le 10 septembre, il était à 3 m. 40.

Aux mêmes dates, le débit de la Source Bias passait de 2,5 à 0,5 litre/seconde, et celui du Pré Voguet de 20 litres/seconde à 0.

En août, tombèrent 80 mm. d'eau, ne provoquant pas la remontée de la nappe, et sans action sur les sources thermales (à cause de l'intensité de l'évaporation); mais le 15 septembre, une chute brutale de 25 mm. provoque un remplissage appréciable du glaciaire, que mettent en évidence les courbes présentées sur les graphiques; cependant, l'Urgonien a absorbé toute l'eau qu'il a reçue (car le débit du Pont de Bois n'a pas varié), les eaux du glaciaire ne se sont pas écoulées dans l'Urgonien et la température d'Alun reste inchangée à $45^{\circ}4$.

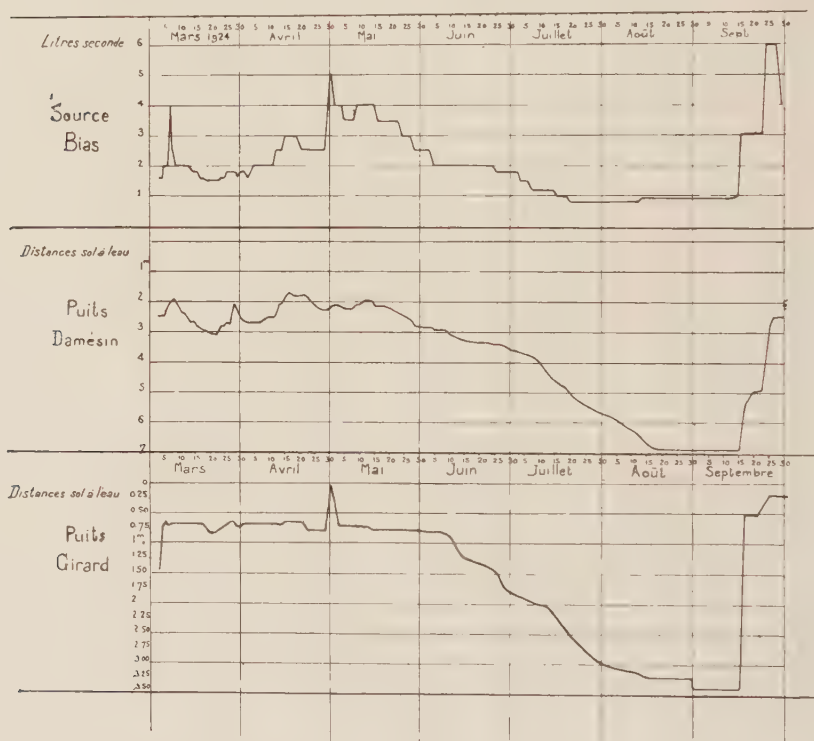
Cette première phase, où les eaux thermales n'ont subi encore aucune perturbation, est celle du remplissage de l'éponge glaciaire; lorsque celle-ci est saturée, son excès d'eau va s'écouler dans l'Urgonien et causer l'atteinte de l'eau thermale.

En effet, 109 mm. de pluie tombée en deux jours, les 23 et 24 septembre, ont provoqué l'élévation générale des niveaux et des débits du glaciaire (voir le schéma); le Pré Voguet, sec jusqu'alors, donne 10 litres/seconde, l'Urgonien est atteint par les apports du glaciaire; le débit du Pont de Bois passe de 1 à 10 litres/seconde et, dès le 24 septembre, la température des eaux d'Alun s'abaisse de 45°4 à 36°8.

Le schéma suivant montre clairement le rapport intime qui lie les variations de la pluviosité à celles de la thermalité des sources; dès la cessation de la pluie, l'alluvion est gorgée d'eau, la température se relève et va se maintenir jusqu'à une nouvelle pluie (26 septembre); celle-ci tombe l'après-midi, alors que la température d'Alun était remontée à 40° à 15 heures; sept heures plus tard, à 22 heures, la température de l'eau thermale n'est plus que 33°5 : la transmission n'a pas demandé plus de sept heures; fait extrêmement grave : ce n'est pas en effet une infiltration d'eau froide à circulation ralentie, mais une introduction massive d'eaux froides qui ne proviennent d'ailleurs que d'une très courte distance, pas plus de

500 mètres (d'après les vitesses enregistrées par les expériences à la fluorescéine).

Pendant cette importante perturbation, Soufre a peu réagi, n'ayant varié que de 41°8 à 38°8.



Les efforts de la mission hydrologique se sont portés à connaître l'ordre de grandeur du phénomène, à l'aide des mesures caractéristiques données par les appareils que nous avons décrits dans la première partie.

Alun	Débit (en lit./sec.)	Tempé- rature	Résistivité électrique (en ω)
En régime de saison			
sèche (juill. 1924)	27,4	45°7	1.640
<i>Id.</i> , perturbation ...	? (1)	33°5	1.705

Les observations précédentes ont permis de mettre en cause l'eau des alluvions glaciaires; si l'on prend comme type de température de cette eau celle de la Source Bias (13°), on pourra se livrer au calcul approximatif du débit et de la composition minérale de l'eau froide envahissante, d'après les méthodes que nous avons exposées dans la première partie.

Chaleur perdue par l'eau thermique = chaleur gagnée par l'eau froide.

Le débit de l'eau thermique $D = 27,4$ litres/sec. Nous pouvons calculer celui de l'eau froide :

$$27,4 (45,7 - 33,5) = x (33,5 - 13)$$

$$x = 16 \text{ L litres/sec.,}$$

c'est-à-dire que Alun a reçu plus de la moitié de son débit d'eau étrangère.

Le même calcul pour Soufre nous montre que :

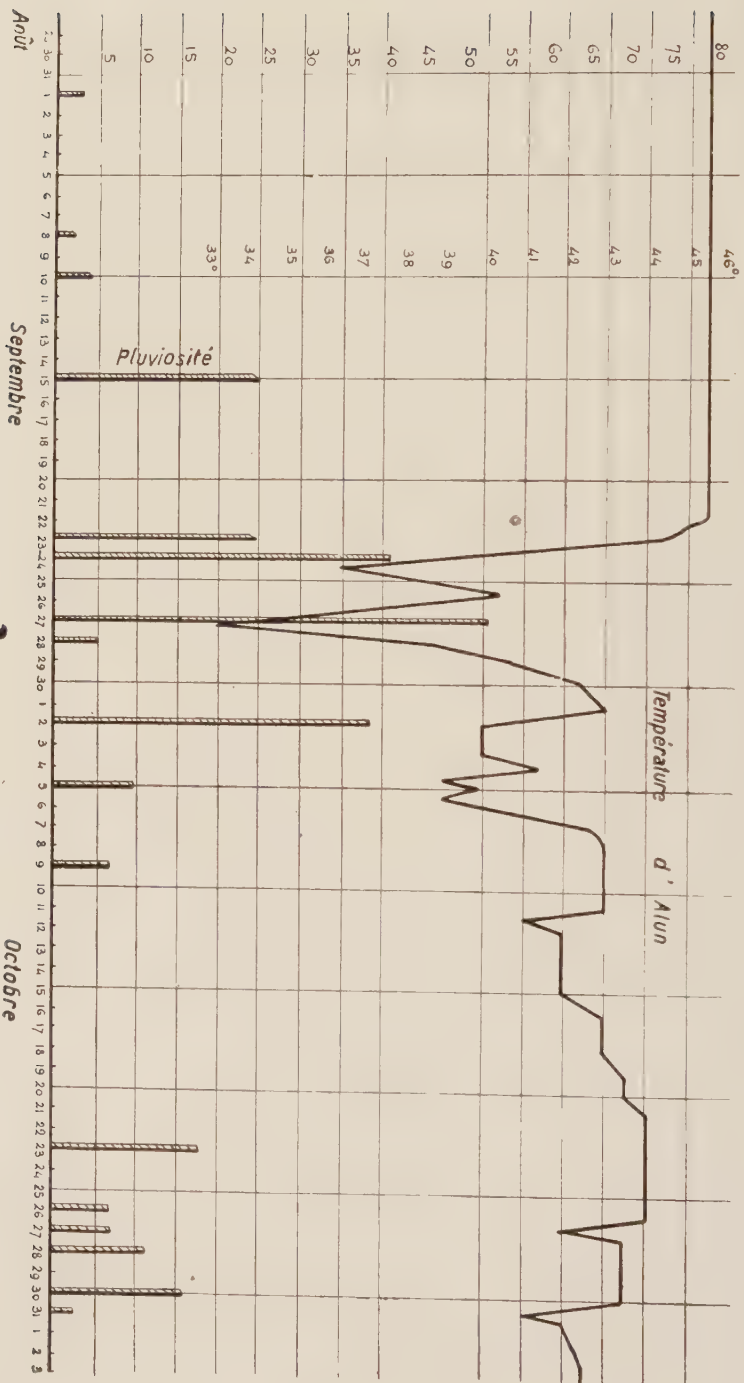
$$11 (41,8 - 38,8) = x' (38,8 - 13)$$

$$x' = 1,2 \text{ litre/sec.}$$

Soufre reçoit donc un dixième seulement de son débit l'eau étrangère et 14 fois moins que Alun; aussi,

Pluies
m₁ 85

Degres



1 9 2 4

Octobre

ses variations sont-elles beaucoup plus faibles, ce qu'a démontré l'expérience.

On peut également calculer la composition chimique totale de l'eau étrangère, puisque nous en connaissons l'expression pratique, c'est-à-dire leur résistivité : en effet, d'après la règle des mélanges : (1)

$$\frac{27 \text{ L}''}{1640} + \frac{16 \text{ L}''}{R} = \frac{43 \text{ L}''}{1705},$$

d'où $R = 1.830 \omega$,

ce qui correspond bien à la résistivité électrique courante des eaux glaciaires, qui, d'après les mesures, oscille entre 1.825 et 2.063, et ce qui permet d'éliminer comme cause des perturbations les eaux froides qui pénètrent par ruissellement superficiel, tel que le Ru des Moulins, car leur résistance est de 3.165 ω : donc, les eaux étrangères appartiennent de toute évidence à la nappe hydrostatique sous glaciaire.

2° *Perturbation de décembre 1925.* — L'année 1925 a été plus humide encore que la précédente; en septembre, l'alluvion glaciaire a fait son plein d'eau : le niveau du puits Damesin est à moins de 2 mètres du sol; celui du puits Girard, à 0 m. 90.

En décembre, du 22 au 25, de fortes pluies déversent 117 mm. d'eau; aussitôt, la température d'Alun,

(1) On ne connaît pas exactement le débit de Soufre, mais on peut lui attribuer la valeur de 11 litres.

qui était de 45°, tombe successivement à 41° le 25 et à 30° le 26 au soir, pour se relever autour de 40-41° dans les premiers jours de janvier.

En hiver, les eaux glaciaires sont très froides: 7°6.
Soient : *a* le débit de l'eau chaude;
b le débit de l'eau froide.

La règle des échanges de températures donne :

$$a (40 - 32) = b (32 - 7,6)$$

$$b = 0,33 a.$$

L'eau thermale reçoit le 1/3 de son débit d'eau froide. Mais à ce moment, des prélèvements et dosages montrent que la minéralisation d'Alun s'est relevée, à l'inverse de sa température, preuve évidente que les apports sont plus minéralisés que l'eau thermale :

Alun	Chiffres	
	au 26 déc.	au 6 janv.
Température.	32	40°
Extrait sec.	0 gr. 473	0 gr. 456
Degré sulfhydrométrique	0°46	0°51
Alcalinité en CaO.	140	128
Sulfates de SO ³	104	112

L'eau perturbante est plus riche en chaux et moins riche en sulfates, et un peu plus minéralisée que l'eau thermale.

3° *Perturbation de l'été 1927.* — L'année 1927 a été encore plus humide que les deux précédemment citées : tandis que les mois de juin à septembre sont ordinairement secs et donnent une moyenne de 280 mm., ils ont enregistré 793 mm. Les sources thermales sont, comme nous l'avons vu plus haut, sensibilisées et il subit de 88 mm. tombées les 18-19 août pour abaisser de 7° la température d'Alun, de 43° à 36 qui remonte de nouveau ensuite à 40° pour retomber encore à 35 ° après 67 mm. d'eau tombée du 21 au 25 août.

Ces pluies abondantes ont continué en septembre, abaissant progressivement la température d'Alun, qui tombe jusqu'à 31° le 25 septembre, mais se relève presque aussitôt.

Cette série de perturbations ont fait l'objet d'une étude qui a donné les résultats suivants :

Alun	27 août	3 sept.	25 sept.
—	—	—	—
Température.	37°	40°	33°
Alcalinité en Ca O	126	120	132
Acide sulfurique en SO ³	86,5	97	87
Chlorures (en chlore) ..	15	16	13

ce qui a permis le calcul de l'importance et de la composition de l'eau parasite.

1° Variation du 27 août. — Soit a le débit de la source thermique, dont la température (40°) s'est abais-

sée à 37° après la réception d'un débit d'eau froide, dont la température peut être estimée à 15° (Source Bias).

$$a (40 - 37) = b (37 - 15)$$

$$0,13 a = b.$$

L'eau thermale a donc reçu 1/8 de son débit en eau froide.

Pour calculer l'alcalinité — un des éléments de minéralisation de cette eau froide — on part de la connaissance de l'alcalinité du mélange (0,126 gr.) et de celle d'Alun (0,120), à 40°.

$$a (126 - 120) = b (x - 126)$$

ou, en remplaçant b par sa valeur en fonction de a :

$$a (126 - 120) = 0,13 a (x - 126),$$

d'où, valeur de $x = 0,172$ de Ca O. Or, cette alcalinité a été observée à la Source Bias le 3 septembre (1), constatation qui nous prouve une fois de plus l'origine glaciaire de l'eau perturbante tandis que l'eau thermale est bien moins riche en Ca O (0,128).

2° Variation du 15 septembre 1927. — Ce sont les mêmes eaux qui ont causé cette altération, bien que la chute de température soit plus forte et que l'eau froide ait atteint le griffon thermal en plus grande quantité; en effet :

$$a (40 - 3 = b (33 - 14)$$

$$a 0,36 = b.$$

L'eau froide représente donc $1/3$ du débit total.

L'alcalinité x en est encore un chiffre très voisin des précédents :

$$a (132 - 120) = b (x - 132)$$

$$x = 0,165 \text{ gr. Ca O.}$$

4° *Observations des variations du débit.* — La mise en place, en septembre 1928, de l'appareil de mesure des débits décrit chapitre III a permis l'étude des variations simultanées de la pluviosité, des débits du glacier et de l'eau thermale et des températures d'Alun, dont le détail de juillet à décembre 1929 est donné par le schéma ci-contre (1).

Après les pluies d'août, seul le puits Girard a réagi; la source Bias, à son origine d'été, donne 0,7 litre/seconde; le puits Damesin est à 5 m. du sol; on en déduit qu'un seuil sépare les deux situations, le puits Girard peut se rapprocher jusqu'à 0 m. 70 du sol sans que les sources thermales réagissent; à partir de cette cote, la température des eaux baisse, c'est donc la cote sensible au delà de laquelle les perturbations vont se manifester à Alun.

Les pluies de fin septembre font déborder Girard, qui coule à la surface, tandis que Bias débite 5 litres-seconde et que Damesin arrive à 3 m. 60 du sol; cependant, Alun a réagi et une faible infiltration d'eau froide a ramené sa température de 46 à 44, tandis que le débit s'élève de 40 lit. 2 à 44 lit. 5.

L'observation de l'été et de l'automne, et la me-

sure des débits ont montré l'importance de l'invasion des eaux froides, puisque celles-ci ont pu arriver à faire monter à 68 litres/seconde le débit d'Alun; pendant cette période, l'augmentation constante du taux des alcalis et l'abaissement du taux des sulfates ont fait la preuve de l'invasion des eaux étrangères.

L'année suivante (1929), des observations poursuivies avec encore plus de détail ont conduit à des graphiques dont l'examen montre le parfait synchronisme des mouvements de la nappe glaciaire avec les variations de température qui se maintiennent à Alun. Dès que le plan d'eau de cette nappe se relève à une certaine cote, il y a un débordement qui se fait au profit des diaclases de l'Urgonien. L'équilibre hydrostatique de cette nappe qui se constitue sur le mar, tapissant la base de la formation n'est pas parfait avec les eaux de l'Urgonien. Elle en est indépendante, et le fait que ces eaux passent dans l'Urgonien seulement sous des conditions hydrostatiques toujours les mêmes indique que le phénomène est lié à des questions de charge provoquant l'introduction.

En résumé, eu égard aux conditions locales (propriété Chevalley, réservoir de la Grimotière), il suffira de ne pas permettre aux eaux glacières d'atteindre les cotes critiques pour éviter que le phénomène ne se reproduise. Mais comment parvenir à ce but?

Nous arrivons donc à la conclusion qui se dégage de ces études et qui feront l'objet du dernier chapitre.

CHAPITRE X

L'étude de la mission d'hydrogéologie montre clairement que les eaux thermales étaient menacées d'un grave danger, celui-ci susceptible d'ailleurs de deux sortes de mesures :

1° des mesures de détail, consistant à modifier certains drainages dangereux, à faire disparaître certaines nuisances, par des travaux de faible importance;

2° un plan général de protection, nécessitant de grosses dépenses et destiné à se réaliser progressivement.

I. — LES MESURES DE DÉTAIL

a) *La propriété Chevalley.* — Le précédent chapitre nous a montré, avec les preuves d'une indubitable expérience, les dangers que faisaient courir aux sources la présence non surveillée d'une propriété de rapport située juste au-dessus d'elles. Evidemment, il est

encore préférable que ce domaine restât conservé sans morcellement, mais il serait désirable qu'il devienne propriété de l'Etat, afin de le faire rentrer dans un périmètre de protection sanitaire.

Grâce aux efforts de la Direction de l'Etablissement thermal, et à l'aide d'une subvention de l'Institut d'Hydrologie, on a pu obtenir la cessation de l'exploitation de la ferme, qui sera convertie en dépendance du Splendid-Hôtel. Trois postes de W.-C., aménagés avec des chasses d'eau, seront créés à la ferme, à la maison du gardien et à la villa; un égout recueillera ces eaux-vannes et les évacuera au réservoir municipal. En outre, le ruisseau parcourant le chemin de la Carattière sera canalisé dans 800 mètres de cunettes bétonnées et cimentées (1).

b) *Le réservoir de la Grimotière.* — Des travaux importants sont en cours, consistant en la révision des canalisations qui éviteront toute perte d'eau froide dans l'Urgonien. Ces travaux ont déjà donné un certain résultat : depuis que l'apport d'eau froide due au réservoir est supprimé, on n'enregistre plus l'oscillation journalière des températures, et la source thermale, n'étant plus à chaque instant refroidie par les apports garde une température moyenne plus élevée.

II. — LES MESURES D'ORDRE GÉNÉRAL

Il nous reste à examiner rapidement quelles ont

(1) Les travaux sont en cours d'exécution depuis 1926.

été les solutions proposées pour remédier à l'ensemble de cette situation, et quelle sera désormais la marche des travaux décidés qui permettent d'établir autour des eaux thermales d'Aix-les-Bains une protection réelle.

a) *Les solutions proposées.* — Dès le début de ces recherches, le Service des Mines a proposé un réseau de galeries établies dans l'Urgonien à une cote légèrement inférieure à celle des griffons, solution reposant sur la considération des pressions hydrostatiques réciproques et qui avait déjà été proposée par l'ingénieur FRANÇOIS, puis par M. DAGALLIER. Cette méthode est destinée, en supposant une anastomose suffisante des circulations, à établir un équilibre du plan de l'eau étrangère par rapport à celui de l'eau thermique.

Soit une diaclase d'ascension des eaux thermales, en A le point où viennent s'infiltrer les eaux parasites situées à une profondeur h au-dessous du griffon d'émergence G et à une profondeur h' au-dessous du point d'infiltration ; la pression statique dans la colonne d'eau chaude aura pour valeur le poids d'une colonne d'eau chaude ayant pour hauteur une section égale à l'unité, tandis que la pression statique dans la colonne d'eau parasite, froide, aura pour valeur le poids d'une colonne d'eau froide ayant une hauteur h' pour une section égale à l'unité. Théoriquement, il ne doit pas y avoir mélange des eaux ni péné-

tration d'une des deux colonnes dans l'autre si les pressions hydrostatiques des deux colonnes sont égales.

En réalité, il faut faire intervenir la différence de densité entre les eaux chaudes, qui sont plus légères, et les froides, plus lourdes; aussi la colonne chaude devra-t-elle occuper un volume plus grand que la colonne froide, c'est-à-dire être plus élevée pour une section égale; il faut noter aussi qu'il y a plusieurs plans d'infiltration des eaux froides et que le niveau statique de celles-ci est variable, déterminé par le niveau de l'eau dans le système des cassures, que peut influencer la pluviosité, le dégel, etc.; au contraire, le plan des eaux chaudes est celui du griffon, donc invariable.

Pour rendre le niveau statique froid invariable, le Service des Mines proposait la création d'un réseau de galeries destiné à drainer les eaux froides à une cote inférieure à celles de la source d'Alun, et qui comporterait des barrages simples où on chercherait par tâtonnement la valeur optimum de la différence $h - h'$ qui, comprise entre 0,20 et 1 m. 25, reporterait le point A (contact entre les eaux froides et les eaux chaudes) entre 15 et 150 mètres. Un système de galeries, creusé le plus près possible de la Source d'Alun, devait avoir un plan passant à 0 m. 80 au-dessous de la source thermique.

Tout en reconnaissant l'utilité de ces galeries de drainages, l'Institut d'Hydrologie, basant son opinion sur l'étude des grandes perturbations (voir plus haut), craignait que le système d'équilibre proposé par le Service des Mines se montrât inopérant : en effet, si les phénomènes qui régissent l'équilibre de deux fluides peuvent dans une certaine mesure s'exercer au sein d'une formation homogène et perméable comme des alluvions, il ne peut en être de même dans le cas de ces déversements massifs, tels ceux rapportés au chapitre précédent, d'eau étrangère dans l'eau thermique; il est peu probable qu'un tel mécanisme puisse subsister entre les eaux chaudes et les eaux froides, à des températures aussi différentes; les eaux glaciaires, animées d'une certaine force vive, avant de trouver leur équilibre profond, doivent parcourir les fissures urgoniennes, et les galeries proposées ne seront efficaces qu'autant que, par un hasard fortuit et imprévisible, elles recouperont des diaclases actives transportant les eaux froides vers les eaux chaudes.

Le Service des Mines, ne cachant pas sa sympathie pour la méthode de FRANÇOIS, assurait qu'à une même température pouvaient correspondre des débits très différents et que, par suite de l'intervention de variations de charge également fortuites, on pouvait prévoir, au moins théoriquement, que l'eau thermique pénétrât dans des cassures froides; ces observations avaient pour support la connaissance précise du dé-

bit (grâce aux appareils et aux méthodes précédemment décrits), et de la probabilité du mécanisme d'échange entre l'eau thermique et les eaux parasites.

Cependant l'intrusion des eaux chaudes n'aurait pas été sans frapper les usagers des puits fixés dans l'Urgonien, à l'aval de cette situation, d'autant que c'est une constatation d'observation courante sur d'autres champs émissifs thermaux.

Par contre, l'Institut d'Hydrologie voyait la possibilité de saisir ces eaux parasites du glaciaire avant qu'elles n'aient encore quitté l'alluvion, et dès 1924 le professeur BORDAS disait « qu'il faudrait aux abords d'Aix, et à une distance de plus de 300 à 400 mètres des griffons thermaux, connaître par une série de petits sondages le profil du contact de l'alluvion glaciaire avec la formation calcaire pour y installer un réseau drainant les eaux de cette alluvion ».

Cinq ans plus tard, à la suite du levé géologique des abords immédiats des eaux thermales, on pouvait estimer que les travaux de drainage seraient particulièrement utiles sur ce cap topographique que forment les alluvions glaciaires dominant immédiatement les sources thermales; là, paraît être le lieu vraisemblable d'accumulation des eaux extérieures capables de pénétrer dans l'Urgonien et de se mélanger aux eaux thermales.

Aussi l'Institut d'Hydrologie s'est-il ramené à l'idée, depuis longtemps émise par le professeur BORDAS, de soutirer cette eau accumulée dans le glaciaire.

Sous la réserve de connaître par quelques forages préliminaires la puissance de la formation glaciaire, cette idée envisage le tracé d'une galerie à l'aval du puits Girard, à l'amont du puits Damesin, vers la cote 350, s'arrêtant sur le mar glaciaire et évacuant ses eaux au Nord sur le Ru des Moulins, au Sud sur celui du Gachets. L'étude de FLANDRIN, accompagnée de mesures de la profondeur des puits et de l'étude de la nature des terrains traversés constitue une première base pour l'appréciation de l'épaisseur des terrains glaciaires et de l'importance des travaux à entreprendre; les mesures de la distance au sol des niveaux d'eaux dans ces puits ont permis d'établir les courbes piézométriques de la nappe souterraine et de montrer que l'écoulement suivait une ligne de direction privilégiée Puits Girard-Puits Voguet.

Le Service des Mines a présenté un certain nombre d'objections à ce projet de galeries, portant sur les trois points suivants :

1° le terrain glaciaire, hétérogène, forme des nappes discontinues à des cotes différentes : une galerie unique risque de ne le saisir qu'imparfaitement et incomplètement;

2° la galerie, placée trop près du puits Girard, laissera à son aval une surface dénudée d'Urgonien assez

importante et capable d'absorber de l'eau de ruissellement en quantité non négligeable;

3° enfin, la construction et le maintien de galeries de drainage dans le glaciaire inconstant constitueront un travail difficile et coûteux; le débit des eaux à évacuer peut atteindre, à certains moments, 1.000 m³-h., nécessitant de larges et profondes tranchées.

Il est indubitable que l'alluvion présente une certaine hétérogénéité; aussi, une série de sondages pratiqués à 300-400 m. des griffons thermaux nous a toujours paru indispensable pour établir un tracé judicieux du réseau drainant; les indications du professeur BORDAS en avaient signalé l'emplacement très approximativement, à l'aval du puits Girard et à l'amont du puits Damesin; l'infiltration d'eaux superficielles serait inévitable si on établissait la galerie trop près de Girard, mais autrement moins grave que si l'on plaçait le travail drainant à l'aval de la zone d'introduction des eaux glaciaires dans l'Urgonien, auquel cas le but serait fatalement manqué.

b) *Les solutions arrêtées.* — En présence de ces propositions, les données acquises sur l'ensemble du problème ont paru assez avancées et convaincantes pour que la Commission du Conseil Supérieur d'Hygiène se soit rallié à un projet de drainage (proposé par M. SCHNEIDER), et qui est une des modalités des propositions de l'Institut d'Hydrologie.



La protection des eaux sera réalisée par l'établissement d'un drain profond dans le glaciaire qui, tracé à l'amont du puits Damesin et orienté N.E.-S.W., barre le cap glaciaire. Il se développe sur 500 mètres linéaires à 300 mètres de distance horizontale d'Alun. Sa cote d'armature est à 325-330 mètres.

Ce drain écoulera les eaux latéralement, d'une part au Ru des Moulins, d'autre part au Ru des Gachets. L'ouvrage drainera jusqu'au contact de l'Urgonien, et une série de sondages d'essai en déterminera la profondeur.

Avant le creusement de ce drain profond, M. SCHNEIDER a estimé qu'un drain plus superficiel pourrait avoir une étanchéité très suffisante pour éliminer du champ émissif une partie importante des eaux froides; cet ouvrage, établi à 2 m. 50-3 mètres de profondeur, barrerait, un peu plus bas, le cap glaciaire sur un développement de 400 mètres, à la cote moyenne 315, la source d'Alun à protéger étant à la cote 283.

Dix sondages préparatoires effectués sur le tracé du drain superficiel viennent d'indiquer que l'Urgonien plonge de la route de Mouxy à l'axe du cap glaciaire et se relève depuis cet axe en direction du ruisseau des Gachets vers le Sud, dessinant un fond de bateau occupé par l'alluvion glaciaire, qui s'est montrée la zone facile d'accumulation que l'on prévoyait.

(1) Le coût de ce drain ne serait que de 150.000 francs; or, parmi les projets du Service des Mines, celui basé sur les pressions hydrostatiques réciproques et consistant en série de galeries de drainages, demanderait environ 1 million 1/2.

CONCLUSION

Ainsi, l'immuabilité de l'eau thermale, tenue naguère pour un dogme, est un mythe périmé; l'enregistrement des températures et des débits, combiné à la connaissance périodique de quelques éléments simples de leur composition, constituent les meilleurs et les plus sûrs éléments de la surveillance des eaux, soumises à de lentes et inappréciables variations comme à de brutales altérations. Les données qu'apportent les méthodes hydrologiques seront utilisées pour la détermination du périmètre de protection et des mesures de sauvegarde.

S'il n'est pas encore possible d'affirmer avec précision quelle est l'origine des Sources d'Aix, la mission de l'Institut d'Hydrologie n'en a pas moins contribué à éclairer la question et à faire tomber certaines des hypothèses qu'on avait pu émettre.

Cette surveillance des eaux, du ressort de l'Hygiène, ne peut laisser indifférent le médecin, car c'est en définitive pour assurer la constance et l'efficacité de son thérapeutique que le physicien, le géologue et l'hygiéniste unissent leurs efforts et arrachent leurs complexes secrets aux mystérieuses eaux chaudes et guérissent.

Paris, le 1^{er} Avril 1932.

Vu : *Le Doyen,*
BALTHAZARD.

Vu : *Le Président de Thèse*
L. TANON.

Vu et permis d'imprimer,
Le Recteur de l'Académie de Paris :
CHARLETY.

BIBLIOGRAPHIE

PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE

1. D'ARSONVAL, BORDAS et TOUPLAIN. — « Les Eaux minérales des groupes d'Aix-les-Bains et Marlioz ». — *Annales des Falsifications* (1923).
2. — BARBIER. — « La Savoie minérale et thermale », Chambéry, 1878.
3. — BERTHET (D^r P.-L.-J.), Aix-les-Bains. — « Traité complet des Eaux d'Aix en Savoie », chez Puthod, Chambéry, 1862.
4. BERTHIER. — « Eine salinische Efflorescenz von Aix in Savoyen, 1838.
5. BESSON (L.). — « L'observatoire climatologique du Mont Revard », *Annales de l'Institut d'hydrologie*, n° 1, 1928.
6. — BILLIET (Mgr Alexis) . — « Aperçus géologiques sur les environs de Chambéry », *Mémoires de l'Académie de Savoie*, 1^{re} série, tome I, 1825, page 35.
7. — « Discours sur l'état de la constitution géologique de la Savoie ». *Bulletin de la Société Géologique de France*, 2^e série, I, page 607.

8. — BONJEAN (Joseph). — « Analyse chimique des Eaux minérales d'Aix en Savoie », Chambéry, 1838, pages 1 à 42.
9. — — « Analyse des Eaux d'Aix et de Challes (Savoie). » *Bulletin de la Société Géologique de France*, 2^e série, tome I, 1844, page 751.
10. — — « Des eaux minérales et principalement de celles d'Uriage, de la Motte, d'Allevard, d'Aix. — *Congrès Scientifique de France*, 24^e session, Grenoble, I, 1857, page 593.
11. — BORDAS (D^r Frédéric). — Congrès d'Hydrologie et de Climatologie de Monaco, 1920.
12. — — « Les constances physiques et chimiques des eaux minérales », *Annales des falsifications* (1923).
— — (D'ARSONVAL, — —, et TOUPLAIN). Cf. d'Arsonval, note 1.
13. — — et TOUPLAIN. — « Considérations générales sur la conductibilité électrique des eaux ». *Annales des Falsifications* (décembre 1926).
14. — — et TOUPLAIN. — « Manomètre différentiel pour la détermination du débit des fluides ». *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*.
15. — CHAMOUSSET (Chanoine). — Comptes rendus de la Société Géologique de France, à Chambéry, 1844. Chez Bourgogne et Martinet, à Paris, 1845.
16. — CHASSEVANT (A.). « Contrôle et surveillance des eaux minérales au moyen de la réfractométrie et de la résistivité électrique. *Annales de la Société d'Hydrologie médicale*, tome LVII, page 123.
17. — COMBAZ (Abbé Paul). — « Glacière et fluvio-glacière du Massif des Bauges. *Bulletin de la Société d'Histoire naturelle de la Savoie*, tome 16 (1911-12), pages 81-147.

18. — DACQUIN (Joseph). — « Analyse des eaux thermales d'Aix en Savoie », chez Garrin, Chambéry, 1773.
19. — DESCOTES (F.) et PILLET. — « Le Grand Revard et l'orographie de la Chaîne du Nivolet », chez Chamberat, Paris, 1876-77.
20. — DESPINE (D^r Constant). — « Manuel topographique et médical de l'étranger aux eaux d'Aix en Savoie », Annecy, 1842.
21. — DIENERT (F.). — « Analyse des Eaux douces et minérales », chez Béranger, à Paris.
22. — — « Sur la circulation en terrain fissuré ». *Compte rendu de l'Académie des Sciences*, t. 176, page 756, séance du 14-3-1923.
23. — DOUXAMI (H.). — « Etudes sur les terrains tertiaires du Dauphiné, de la Savoie et de la Suisse occidentale », thèse de Paris, 1896.
24. — — et REVIL (Joseph). — « Note sur les terrains tertiaires du plateau des Déserts », *Bulletin de la Société des Sciences naturelles de la Savoie*, 2^e série, IV, 1897-98, pages 105-138.
25. — FRANCŒUR (J.). — « Sur la présence de l'acide sulfurique libre dans les eaux d'Aix (Savoie), 1829.
26. — GIMET (F.-S.). — « Excursion au Mont Revard ». *Bulletin de la Société d'histoire naturelle de la Savoie*, 2^e série, I, 1895, pages 37-43.
27. — GORCEIX (Charles). — « Essai morphologique sur le lac du Bourget et la région d'Aix-les-Bain, Annecy, 1919.
29. — GUILLERD (A.). — « Notions d'hydrologie appliquée à l'hygiène », chez Béranger, à Paris.
30. — — Périmètre de protection des eaux potables (au point de vue hydrologique », *Annales d'Hygiène publique, industrielle et sociale*, août 1929.

31. — — « Protection géologique des eaux thermo-minérales ». *Annales d'Hygiène publique, industrielle et sociale*, août 1925.
32. — — « Température des eaux minérales ». *Annales de l'Institut d'hydrologie*, n° 24 (1931).
33. — — « Mesure de résistivité électrique des eaux minérales sur le terrain ». *Annales des Falsifications* (Septembre 1931).
28. — DE GROSROUVRE. — « Contribution à l'étude de l'hydrologie des terrains calcaires ». *Bulletin de la Société Géologique de France*, 4^e série, tome XVI, 1916, page 65.
34. — HOLLANDE (D.). — « Lemenc et Nivolet au Nord de Chambéry ». *Bulletin de la Société géologique de France*, 3^e série, tome VII, 1879, page 678.
35. — — « Les terrains du Nivolet, au Nord de Chambéry, comparés à ceux du Corbelet et du Mont du Chat ». *Bulletin de la Société géologique de France*, 3^e série, tome VIII, 1880, page 212.
36. — — « Les terrains tertiaires de la Savoie, situés dans la zone subalpine au Nord de Chambéry ». *Revue Savoisiennne*, tome XXVI, page 172.
38. — — « Etude sur les dislocations des Montagnes calcaires de la Savoie », Imprimerie Nouvelle, à Chambéry, 1889.
39. — — « Contact du Jura méridional et de la zone subalpine aux environs de Chambéry ». *Bulletin du Service de la Carte géologique de France*, tome IV, 1892, n° 29.
40. — — « Feuille de Chambéry ». *Bulletin du Service de la Carte géologique de France*, tome VI, n° 38, 1894-95, pages 1 à 18; tome VII, n° 44, 1895-96, pages 121 et 124; tome IX, n° 59, 1897-98, pages

130-133 et pages 404-407; tome X, n° 63, pages 131-137 et n° 69, pages 98-100 (1898-99).

41. — — « Etude Stratigraphique des terrains tertiaires de la vallée des Déserts ». *Bulletin du Service de la Carte géologique de France*, tome VI, 1895, n° 41.
43. — IMBEAUX (D^r Ad.). — « Traité d'Hydrologie. Recherche, étude et captage des eaux souterraines. Paris, 1930.
43. — KILIAN (W.). — « Sur l'origine probable des eaux thermales d'Aix-les-Bains ». *Livre jubilaire du Cinquantenaire de la Société Géologique de Belgique*, 1923.
44. — LACHENAL. — « Note sur les eaux du Bassin de Chambéry ». Imprimerie Savoisienne, Chambéry, 1897.
45. — LACHÉROY. — « Excursion au Mont Revard ». *Bulletin de la Société d'Histoire naturelle de la Savoie*, 4^e série, tome I, page 68, 1885.
46. — DE LAUNAY (L.). — « Recherche, captage et aménagement des Sources thermo-minérales; chez Béranger, Paris, 1899.
— LE ROUX. — Voir REVIL, note 63.
47. — LORY (Charles). — « Note sur la Carte géologique de la Savoie, publiée par MM. Lory, Pillet et Vallet ». *Mémoires de l'Académie de Savoie*, 2^e série, tome X, 1868, page 59.
48. — — « Essai sur l'orographie des Alpes occidentales considérées dans ses rapports avec la structure géographique de ces montagnes ». *Bulletin de la Société de l'Isère*, 3^e série, tome VIII.
49. — MARTEL (E.-A.). « L'Evolution souterraine »; chez Flammarion, Paris, 1908.

50. — — « Nouveau traité des eaux souterraine »; chez Doin, Paris, 1921.
51. — DE MORTILLET (Gabriel). — « Origine des sources sulfureuses de la Savoie ». *Bulletin de la Société géologique de France*, 2^e série, XIX, 1862, page 802.
52. — NOGUÈS. — « Observation sur le tertiaire des Déserts ». *Bulletin de la Société géologique de France*, 3^e série, tome V, page 308, 1877.
53. — PILLET (Louis). — « Observations géologiques dans les environs de Chambéry ». *Annales de la Société d'Histoire naturelle de la Savoie*, 1845.
54. — — « Description géologique des environs d'Aix-en-Savoie ». — *Mémoires de l'Académie de Savoie*, 2^e série, tome III, 1859 (page 1) et 2^e édition; chez Puthod, Chambéry, 1863.
55. — — « Le terrain urgonien aux environs de Chambéry ». *Bulletin de la Société géologique de France*, 2^e série, tome XXIII, 1866 (page 50).
56. — — « Orographie et géologie de la Chaîne du Nivolet ». *Annales du Club Alpin*, 1876, III, 519.
57. — — L'Urgonien supérieur d'Aix-les-Bains. *Mémoire de l'Académie de Savoie*, 3^e série, tome X, 1883, page 135.
— (DESCOTES et —), Cf. Descotes, note 19.
58. — — « Sur les terrains quaternaires de l'arrondissement de Chambéry ». *Mémoire de l'Académie de Savoie*, 3^e série, tome X, 1883, page 135.
59. — PRIMAT. — « Statistique des eaux minérales de la Savoie et du Dauphiné », 1902.

60. — RENDU (Chanoine). — « Aperçu géologique sur la vallée de Chambéry ». *Mémoires de l'Académie de Savoie*. 1^{re} série, tome VIII, 1833 (page 185).
61. — REVIL (Joseph). — « Histoire de la Géologie alpine de la Savoie (1779-1891). *Mémoires de l'Académie de Savoie*, 4^e série, tome IV, 1891.
— (DOUXAMI et —). Voir Douxami, note 21.
62. — — et VIVIEN. — « Note sur la structure de la Chaîne Nivolet-Revard ». *Bulletin de la Société géologique de France*, 3^e série, tome VIII, 1899, page 365.
63. — — et LE ROUX. — « Observations nouvelles sur la Chaîne Scierroz-Nivolet ». *Revue Savoisienne*, 1906, fascicules 3 et 4.
64. — — « Les eaux thermominérales de la Savoie ». *Revue générale des Sciences*, 30 octobre 1908.
65. — — « L'origine des eaux minérales de la Savoie ». *Bulletin de la Société d'Histoire naturelle de la Savoie*, 3^e série, XII, 1909.
66. — — « Géologie des Chaînes Jurassiennes et Subalpines de la Savoie ». Thèse de Grenoble, 1911, *passim*.
67. — — « Tectonique générale des Chaînes Jurassiennes et Subalpines de la Savoie ». Imprimerie Nouvelle, Chambéry, 1912.
68. — « Hydrologie des massifs savoisiens ». Chambéry, 1925.
69. — SOCQUET. — « Analyse des eaux thermales d'Aix en Savoie ». Chez Cléaz, Chambéry, 1803.

70. — TOUPLAIN. — « Régime des sources hydrominé-
rales. Détermination physico-chimique sur le ter-
rain ». *Annales des Falsifications*, décembre 1926.
— (D'ARSONVAL, BORDAS et —). Voir note n° 1.
— (F. BORDAS et —). — Voir note n° 13.
— (F. BORDAS et —). Voir note n° 14.
71. — « Mesure de la vitesse des fluides ». *Annales de
l'Institut d'hydrologie*, n° 3 (1929).
72. — VIDAL (D' F.). — « Essai sur les eaux minérales
d'Aix-en-Savoie ». Chambéry, 1851.
— VIVIEN (REVIL et). Voir note n° 62.
73. — WILM. — « Analyse des eaux minérales sulfureuses
d'Aix en Savoie et de Marlioz ». *Compte rendu de
l'Académie des Sciences*, tome 96, 1878, page 593.

